

**Akustische Untersuchungen der Phonation
während der Therapie von Rekurrensparesen**

Sabine Gackenholtz

1979



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551927_0075

Akustische Untersuchungen der Phonation
während der Therapie von Rekurrensparesen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Philosophie
an der Ludwig-Maximilians-Universität
zu München



vorgelegt von
Sabine Gackenholtz
aus Dortmund

Referent: Prof. Dr. Hans G. Tillmann

Korreferent: Prof. Dr. Gerd Kegel

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juni 1979



DISSERTATIONS- UND FOTODRUCK FRANK
8 München 2, Gabelsbergerstraße 15, Tel. 2 8 0 9 0 9 0

Danksagung

Bei Herrn Professor Tillmann bedanke ich mich herzlich für die Überlassung des interessanten Themas und für seinen Rat und seine Hilfe. Frau Dr. Full-Scharrer möchte ich meinen herzlichen Dank aussprechen für die Möglichkeiten, die mir an der Hals-Nasen-Ohren-Klinik der Universität München für die Erfassung und die Aufnahme der Patienten zur Verfügung gestellt wurden, sowie ihre freundliche Beratung. Herrn Dr. Simon bin ich dankbar für die Computer-Programme und seine zu jeder Zeit vorhandene Bereitschaft zu Gesprächen und Ratschlägen. Weiterhin möchte ich Frau Hanel für ihre freundliche Hilfe danken. Bei Frau Reuter-Deichl und Herrn Dr. Stierlin jr. bedanke ich mich für die Aufnahmen, die ich von ihren Patienten machen konnte. Mein Dank gilt ferner der Transkriptionsgruppe, die die sicher nicht gerade erholsame Beurteilung pathologischer Stimmen bereitwillig durchführte. Frau Past und Frau Mirasciski ist für die schnelle Erledigung der Schreibaufgaben zu danken. Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken für ihre Unterstützung und bei meinem Mann vor allem für seine Geduld.

"Someone once observed that progress in a scientific field is measured as much by the new questions it generates as by the answers it provides to old questions. By this measure, we have certainly made progress in the area of laryngeal physiology in speech since it seems the more we study the larynx the more we find we don't know about it."

J.J. Ohala 1977

Inhaltsverzeichnis

0.	Einleitung: Standort, Ziel und Aufbau der Arbeit	1
0.	Anatomische, physiologische und akustische Aspekte der Phonation	4
1.1	Sprechorgane	4
1.1.1	Drei Funktionskreise	4
1.1.2	Atmungs- (Respirations-) organe	4
1.1.3	Ansatzrohr	5
1.1.4	Kehlkopf (Larynx)	7
1.1.4.1	Aufbau	7
1.1.4.2	Kehlkopfknorpel	10
1.1.4.3	Innere Kehlkopfmuskulatur	15
1.1.4.4	Äußere Kehlkopfmuskulatur	22
1.1.4.5	Innervation	26
1.1.4.6	Regulation der Aktivitäten im Larynx	28
1.2	Phonation	30
1.2.1	Vorgänge im Larynx	30
1.2.1.1	Methoden	30
1.2.1.2	Bewegungen der Stimmlippen	32
1.2.1.3	Eigenschaften des modulierten Luftstroms	36
1.2.2	Mechanismen im Ansatzrohr	39
1.2.2.1	Quellen akustischer Erregung	39
1.2.2.2	Modifikation des Signals	40
1.3	Laryngeale Kontrolle von Intensität, Grundfrequenz und Stimmhaftigkeit	42
1.3.1	Interrelation der Parameter	42

1.3.2	Kontrolle der Intensität	42
1.3.3	Kontrolle der Grundfrequenz	43
1.3.4	Kontrolle der Stimmhaftigkeit	46
1.4	Zusammenfassung	49
2.	Störungen der Phonation durch einseitige Stimmlippenlähmungen	50
2.1	Beschreibung und Ursachen der Schädigung	50
2.2	Strukturelle Modifikationen im Larynx	50
2.2.1	Position der gelähmten Stimmlippe	50
2.2.2	Form- und Niveauveränderungen	53
2.3	Phonation bei Stimmlippenlähmungen	54
2.3.1	Klinische Befunde	54
2.3.2	Simulation pathologischer Stimmlippenschwingungen	55
2.4	Einschränkung der Kontrolle über die Phonation	56
2.5	Therapeutische Möglichkeiten und Prognose	58
2.6	Akustische Untersuchungen zur pathologischen Phonation	60
2.6.1	Pathologisches Sprachsignal und akustische Verfahren	60
2.6.2	Verfahren im Zeitbereich	61
2.6.3	Verfahren im Frequenzbereich	66
2.7	Zusammenfassung	70
3.	Eigene Untersuchung zur pathologischen Phonation	71
3.1	Ziel der Untersuchung	71
3.2	Sammlung des Materials	71
3.3	Auswertung	73
3.3.1	Erhobene Daten	73

3.3.2	Akustische Analyse	73
3.3.2.1	Vorüberlegungen	73
3.3.2.2	Arbeitsweise der Verfahren	74
3.3.2.3	Akustische Parameter im Zeitbereich	74
3.3.2.4	Akustische Parameter im Frequenzbereich	76
3.3.2.5	Vorgehen bei der akustischen Auswertung	77
3.3.3	Auditiv Beurteilung	78
3.3.3.1	Vorüberlegungen	78
3.3.3.2	Termini der auditiven Beurteilung	79
3.3.3.3	Vorgehen bei der auditiven Bewertung	80
3.4	Ergebnisse	81
3.4.1	Einführung	81
3.4.2	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse für die erste Versuchsperson	82
3.4.3	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse für die übrigen Versuchspersonen	90
3.4.4	Diskussion der einzelnen Parameter	101
3.5	Zusammenfassung	118
4.	Schluß	119
	Bibliographie	121

0. Einleitung: Standort, Ziel und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll mit einer Standortbestimmung innerhalb der Phonetik beginnen: Der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist das Sprachsignal des kranken Sprechers, das auf seine akustischen Eigenschaften hin analysiert werden soll. Die Arbeit ist somit in dem Bereich der Signalphonetik anzusiedeln. Eine engere Bestimmung ihres Standorts kann mit Hilfe des "signalphonetischen Bandes" (Tillmann 1974: 19 ff.) folgendermaßen vorgenommen werden: Es wird der Manifestationsbereich "akustisches Sprachsignal" untersucht auf Zusammenhänge zwischen diesem Manifestationsbereich und bestimmten Teilbereichen des Manifestationsbereiches "Oberflächenverhalten".

Die Teilbereiche des Oberflächenverhaltens, zu denen das akustische Sprachsignal in Beziehung gesetzt werden soll, sind die Phonation, deren pathologische Veränderung und die Wiederkehr ihrer Funktion durch eine Stimmtherapie. Störungen der Phonation und deren Behebung durch eine Therapie manifestieren sich in Veränderungen des Oberflächenverhaltens der an der Phonation beteiligten Organe und ebenso in Veränderungen des akustischen Signals. Die Messung des akustischen Signals mit Hilfe von Parametern, deren Werte sich im Laufe einer Stimmtherapie verändern, und die damit die Gesundheit des Oberflächenverhaltens anzeigen, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit.

Drei Gesichtspunkte motivieren dieses Ziel. Der erste Aspekt ist vor dem Hintergrund der theoretischen Zielsetzung der Signalphonetik zu sehen, die in der Klärung der Zusammenhänge zwischen den Daten aus den verschiedenen Manifestationsbereichen der bei der sprachlichen Kommunikation ablaufenden Prozesse besteht (Tillmann 1974: 31). Im hier konkret gegebenen Fall geht es darum, die Charakteristika der Phonation von Patienten mit pathologisch veränderter Larynxfunktion herauszufinden und zu untersuchen, in welcher Form diese Veränderungen im akustischen Sprachsignal ihre Entsprechung finden.

Zum zweiten ist der Aspekt der Methode zu nennen. Für die Zwecke der hier geplanten Untersuchung sollen Verfahren der digitalen Signal-

verarbeitung eingesetzt werden. Gerade auf diesem Gebiet sind in den letzten Jahren eine Reihe von Techniken entwickelt worden, die mit Hilfe von analogen Verfahren nicht realisierbar sind. Allerdings kann man sicher davon ausgehen, daß die digitalen Verfahren in der Anwendung noch keinesfalls erschöpfend eingesetzt oder besser: erprobt worden sind. Dies soll in der vorliegenden Untersuchung geschehen.

Der dritte Gesichtspunkt ist seinem Wesen nach anwendungsorientiert, und ist im Zusammenhang mit dem Fernziel zu sehen, das Untersuchungen wie der vorliegenden zugrunde liegt: es geht darum, ein diagnostisches Instrumentarium zu entwickeln, das eine objektive Beurteilung der Stimme ermöglicht. Die Notwendigkeit, objektive akustische Verfahren im Bereich der Stimmpathologie zu entwickeln, wurde von Nessel (1960) betont und wurde anläßlich der "Conference on early detection of larynx pathologies" (Moore 1973) hervorgehoben. Die meisten Untersuchungen, in denen das akustische Sprachsignal pathologischer Sprecher bisher analysiert worden ist, hatten das Ziel, gesunde und kranke Sprecher mit Hilfe von akustischen Verfahren voneinander zu unterscheiden. Im Unterschied dazu hat die vorliegende Arbeit das Ziel, zu überprüfen, wie sich die Werte akustischer Parameter im Verlauf einer Stimmtherapie verändern, um danach Aussagen machen zu können über ihre Eignung zum Einsatz in der Diagnostik als Kriterium zur Bewertung des Therapieerfolgs. Eine ausführliche Untersuchung mit dieser Zielsetzung ist m.W. bisher noch nicht durchgeführt worden.

Die Arbeit ist in ihrem Aufbau auf die folgende Weise gestaltet: Zunächst werden die beim Sprechvorgang miteinander wirksamen Systeme anatomisch und physiologisch beschrieben, wobei die an der Phonation beteiligten Organe besonders berücksichtigt werden. Bei der anschließenden Darstellung des Phonationsvorgangs beim gesunden Sprecher werden die Vorgänge im Larynx bei der Phonation und die Eigenschaften des daraus resultierenden akustischen Signals

beschrieben. Schließlich soll gezeigt werden, wie der gesunde Sprecher durch laryngeale Mechanismen die Parameter der Phonation Intensität, Grundfrequenz und Stimmhaftigkeit variieren kann und wie sich in Abhängigkeit davon das akustische Sprachsignal verändert.

Der Gegenstand des zweiten Kapitels ist die Phonation pathologischer Sprecher. Bei allen Patienten, von deren Stimmen für die Zwecke der vorliegenden Arbeit Tonbandaufzeichnungen gemacht wurden, war eine Lähmung des N. laryngeus inferior (recurrens) festgestellt worden. Es werden daher die strukturellen Modifikationen im Larynx beschrieben, die im Gefolge einer Rekurrensparese auftreten, und wie dadurch die Phonation in charakteristischer Weise verändert wird. Anschließend werden die akustischen Verfahren dargestellt, mit denen das pathologische Sprachsignal bisher untersucht worden ist.

Im dritten Kapitel wird die eigene Untersuchung beschrieben. Nach der Darstellung der Materialsammlung werden die akustischen Parameter der Analyse erläutert und die zu erwartenden Tendenzen der Entwicklung formuliert. Zur Kontrolle der Ergebnisse der akustischen Untersuchung liegen für die einzelnen Patienten sowohl die laryngoskopischen Befunde als auch auditive Bewertungen der Stimme vor. Sie werden bei der Beschreibung und der Diskussion der Ergebnisse der akustischen Analyse berücksichtigt. Den Abschluß der Arbeit bildet ein Ausblick, in dem die Fragestellungen, die sich aufgrund der Untersuchungsergebnisse neu ergeben haben, formuliert werden.

1. Anatomische, physiologische und akustische Aspekte der Phonation

1.1 Sprechorgane

1.1.1 Drei Funktionskreise

Die Basis der Bildung eines jeden Sprachlautes ist das Zusammenwirken der drei Funktionskreise Atmung, Phonation und Artikulation. Der Einsatz der an diesem Prozeß beteiligten Organe für die lautsprachliche Kommunikation ist dabei phylogenetisch wesentlich jünger als ihre eigentliche vitale Funktion, die daher auch als Primärfunktion bezeichnet wird (Wängler 1972: 28).

1.1.2 Atmungs- (Respirations-) organe

Die Primärfunktion der Atmung ist die der biologischen Oxydation, ihre Sekundärfunktion besteht in der Erzeugung des zur Phonation notwendigen Luftstroms. Atmungsorgane sind die Lunge (Abb. 1.1a) und die Atmungsmuskulatur. Sie nehmen den überwiegenden Teil des Brustraumes ein, dessen Form im wesentlichen vom knöchernen Thorax bestimmt wird, und der durch das Zwerchfell gegen den darunterliegenden Leibraum abgegrenzt wird. Der Gasaustausch findet in den Alveolen statt, die durch Bronchioli und die sich in Höhe des 4. bis 5. Brustwirbels zur Trachea vereinigenden Bronchien mit den unteren Luftwegen verbunden sind (Sobotta und Becher 1965 Teil 2: 125; Wängler 1972: 36). Beim Vorgang der Einatmung, für den das Zwerchfell der wichtigste Muskel ist, vergrößert sich der Brustraum, und, infolge des Unterdrucks zwischen Thoraxwand und Pleurasäcken, das Lungenvolumen. Durch diese Aktion wird Außenluft in

die Lunge gesogen. Bei der Ausatmung wird durch die Verkleinerung des Brustraumes die verbrauchte Luft aus der Lunge herausgedrückt; Dabei ist aktiv im wesentlichen die Bauchmuskulatur beteiligt, und die Elastizität des Lungengewebes und damit das Bestreben der Lunge, sich zusammenzuziehen, unterstützen diesen Vorgang (Wängler 1972: 52). Bei den Atmungsformen unterscheidet sich die stumme Atmung (*respiratio muta/muta profunda*) von der Atmung während des Sprechens und beim Hören (*respiratio phonatoria/auditoris*): Bei den letztgenannten Typen ist die Einatmungszeit in Relation zur ersten Gruppe verkürzt, die Ausatmungszeit dagegen wesentlich verlängert (Wängler 1972: 62).

1.1.3 Ansatzrohr

Die vitalen Funktionen des Ansatzrohres bestehen im wesentlichen in der Aufnahme, der Zerkleinerung und dem Transport von Nahrung, sowie der Anwärmung, Befeuchtung und Reinigung der Atemluft. Außerdem enthält es die Sinnesorgane für Geruchs- und Geschmacksempfindungen. Bei der Sprachproduktion bilden seine vielfältig verformbaren Höhlungen Resonanzräume, die ein im Larynx produziertes Signal modifizieren. Auch kann im Ansatzrohr selbst durch partielle oder komplette Konstriktionen die akustische Quelle für ein Schallsignal hergestellt werden.

Das in Abb. 1.1b schematisch dargestellte Ansatzrohr besteht aus einer Serie von Hohlräumen, die an der laryngealen Öffnung und dem Ausgang der Speiseröhre (*Oesophagus*) beginnt, und an den Lippen bzw. am Nasenausgang endet. Diese Hohlräume sind der Rachenraum (*Parynx*, *Fauces*), der in die Bereiche *Laryngopharynx*, *Oro-* oder *Mesopharynx* und *Nasopharynx* unterteilt wird, der Mundraum und die Nasenhöhle. Im Ansatzrohr befinden sich die Artikulatoren. Dies sind bewegliche Strukturen, die einen Teil der Wand des Ansatzrohres bilden oder direkt daran befestigt sind (Daniloff 1973). Ihre relativ große Beweglichkeit erlaubt ihnen viele Konfigurationen. Das trifft vor allem auf die höchst mobile und an der Produktion von vielen Sprachlauten beteiligte Zunge zu (Hardcastle 1976:

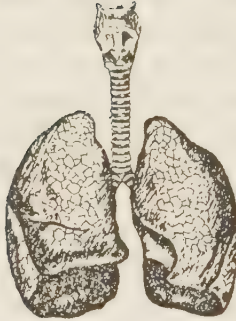


Abb. 1.1a Lungen, Bronchien und Trachea
(nach Wängler, 1972: 34)

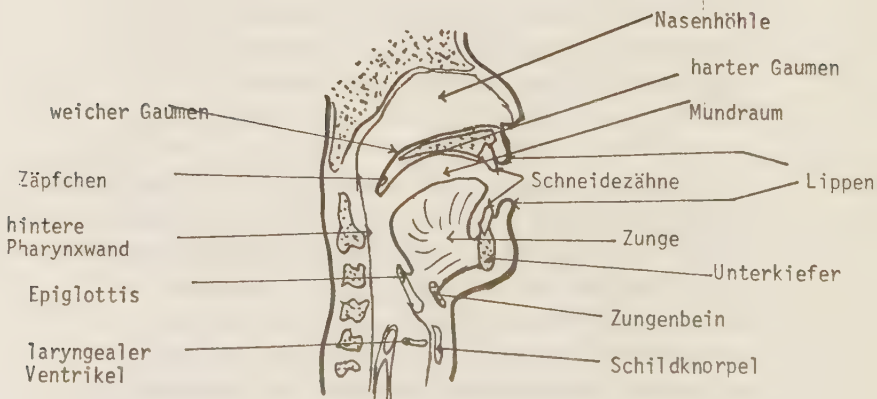


Abb. 1.1b Ansatzrohr mit Artikulatoren
(nach Hardcastle 1976: 89)

1.1.4 Kehlkopf (Larynx)

1.1.4.1 Aufbau

In seiner primären Funktion ist der Larynx ein Sphinkter, der in der Art eines mechanischen Ventils das Heraustreten der Luft aus der Lunge oder das Eindringen von Fremdkörpern in die Trachea verhindert. Bei der Sprachproduktion ist er der erste Modifikator des in der Regel egressiv aus der Lunge fließenden Luftstroms (R.G. Daniloff 1973, Hardcastle 1976:63). Als Bestandteil des Atemtraktes begrenzt er die Trachea nach oben zu. Das knorpelige Kehlkopfgerüst besteht aus gelenkig miteinander verbundenen Einzelteilen. Der Kehlkopf wird gehalten durch Bänder und bewegt durch Muskeln. Innen ist er mit Schleimhaut ausgekleidet (Wängler 1972: 69). Seine untere Begrenzung ist der Ringknorpel (cartilago cricoidea), die obere der Kehldeckel (Epiglottis, cartilago epiglottica). Als Glottis wird die unmittelbare Nachbarschaft der Stimmritze (rima glottidis) bezeichnet (Benninghoff und Goertler 1964 : 186). Bei letzterer werden zwei Bereiche unterschieden: Der vordere Abschnitt (pars intermembranica) befindet sich zwischen den Stimmlippen und der hintere (pars intercartilaginea) zwischen den Aryknorpeln (Sobotka und Becher 1965: 129 f).

In Abbildung 1.1.c zeigt ein koronaler Schnitt die innere Form der Kehlkopfes, bei der drei Etagen unterschieden werden (Benninghoff und Goertler 1964:184): der Unterstock (cavum laryngis oder subglottischer Raum), der Zwischen-

stock (ventriculus laryngis, Morgagni) und der Vorhof (vestibulum laryngis oder supraglottischer Raum). Im Bereich des cavum laryngis werden die elastischen Bestandteile der Trachea vom conus elasticus fortgesetzt, der beim Ringknorpel beginnt und in den Stimmlippen als ligamentum vocale endet. Die Stimmlippen bestehen aus den in ihnen verlaufenden Muskeln, dem ligamentum vocale und der sie umgebenden Schleimhaut (mucosa).

Die Stimmlippen bilden die untere Grenze des ventriculus laryngis, die obere Begrenzung sind die Taschenfalten (plicae ventriculares). Taschen und Taschenfalten sind sehr drüsenreich und berieseln mit ihrem Sekret die Stimmlippen, die ohne Drüsen sind und als engste Stelle im Kehlkopf leicht austrocknen würden (Benninghoff und Goertler 1964: 185). In den Taschenfalten verläuft das ligamentum ventriculare, das untere Ende der membrana quadrangularis. Das vestibulum laryngis erstreckt sich zwischen Taschenfalten und oberem Epiglottisrand (aditus laryngis).

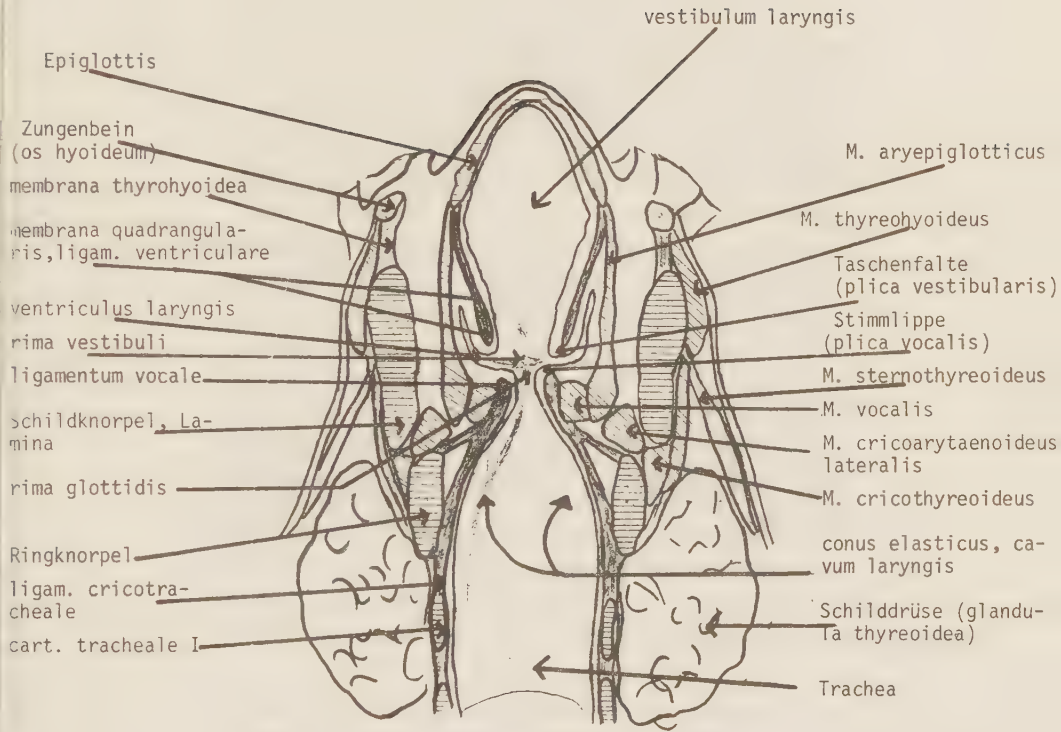


Abb. 1.1c koronaler Schnitt durch den Larynx
(nach Sobotta und Becher 1965: 162)

Die Grenzen des Kehlkopfes sind wichtig für die Unterteilung der Kehlkopfmuskulatur in die Gruppe der "inneren Kehlkopfmuskeln", deren Ursprung- und Ansatzstelle innerhalb des eigentlichen Kehlkopfes liegt, und die Gruppe der "äußeren Kehlkopfmuskeln", bei denen sich Ursprungs- oder Ansatzstelle außerhalb des eigentlichen Kehlkopfbereiches befinden. Die Muskeln dieser beiden Gruppen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Funktion bei der Phonation: Die primäre Kontrolle über die Phonation, über Stellung, Spannung und Konfiguration der Stimmlippen üben die inneren Kehlkopfmuskeln aus (Hardcastle 1976:67). Die äußeren Kehlkopfmuskeln bewegen den Kehlkopf als ganzes oder fixieren ihn in einer bestimmten Position. Dadurch können sie allerdings ebenfalls den Phonationsprozeß beeinflussen (Wängler 1972: 75). Das Knorpelgerüst des Kehlkopfes, die Kehlkopfmuskulatur und deren Innervation sollen im folgenden genauer beschrieben werden.

1.1.4.2 Kehlkopfknorpel

Der Ringknorpel (cartilago cricoidea) (Abb. 1.1.d, Abb. 1.1.e) ist ein geschlossener Knorpelring. Er erinnert an einen Siegelring, dessen Bogen (arcus) vorn verläuft. Die Petschaft, bzw. die Platte des Knorpels (lamina) setzt den Bogen nach dorsal nicht symmetrisch fort: unten schließt sie in gleicher Höhe mit ihm ab, nach oben überragt sie ihn erheblich (Sobotta und Becher Teil 2: 128).

Am Ringknorpel befinden sich vier für den Phonationsvorgang bedeutsame Gelenkflächen: Erstens die beiden Stellen an der rechten und linken Seite der Lamina, an denen der Ringknorpel mit dem cornu inferius des Schildknorpels (cartilago thyreoidea) durch Bänder verbunden wird, und zweitens die Flächen auf der Lamina, auf denen die Verbindung zu den Aryknorpeln (cartilagine aritaenoidae) hergestellt wird.

Der Schildknorpel (Abb. 1.1.d) ist nach dorsal offen und hat dort nach oben und unten sich verjüngende Fortsätze (cornu inferius, cornu superius). Ventral treffen sich seine Platten in einem Winkel, der bei Männern spitzer ist als bei Frauen. Die Aryknorpel (Abb. 1.1.e) sind pyramidenförmige Gebilde, an deren processus vocalis die Stimm lippen ansetzen, während am processus muscularis die für die Bewegung der Aryknorpel wichtigen Muskeln inserieren. Die Epiglottis (Abb. 1.1.d, tw. verdeckt), deren primäre Funktion der Verschluss des Larynx während des Schluckaktes ist, ähnelt einem Schuhlöffel, dessen freier Handgriff hinter dem Zungenrücken liegt (Wängler 1972: 71).

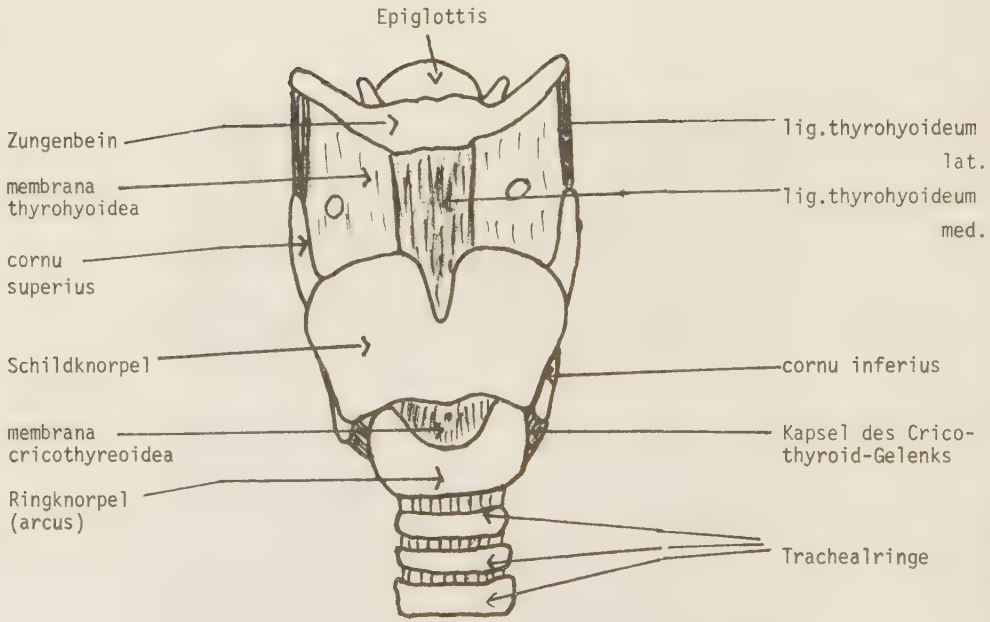


Abb. 1.1.d Kehlkopfgerüst von vorn
(nach Sobotta und Becher Bd. 2: 157)

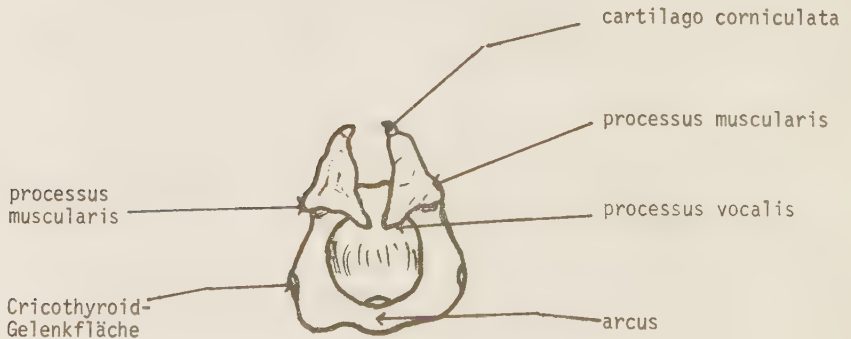


Abb. 1.1.e Ringknorpel und Aryknorpel von innen
(nach Sobotta und Becher Bd. 2: 156)

Zwei weitere Knorpelpaare sind funktionell wenig bedeutend und auch nicht bei allen Individuen ausgebildet: Die Santorinischen Knorpel (*cartilagine corniculatae*) sitzen der apex der Aryknorpel auf, und die Wrisberg'schen Knorpel (*cartilagine cuneiformae*) erstrecken sich von den Seiten der Epiglottis zu den apices der Aryknorpel (Hardcastle 1976: 66). Die Teile des Kehlkopfes sind untereinander und mit benachbarten Strukturen durch eine Reihe von Haftbändern verbunden (Wängler 1972: 72 - 74).

In den Abbildungen 1.1.f und 1.1.g sind die Bewegungen, die die Kehlkopfknorpel gegeneinander ausführen können, schematisch wiedergegeben.

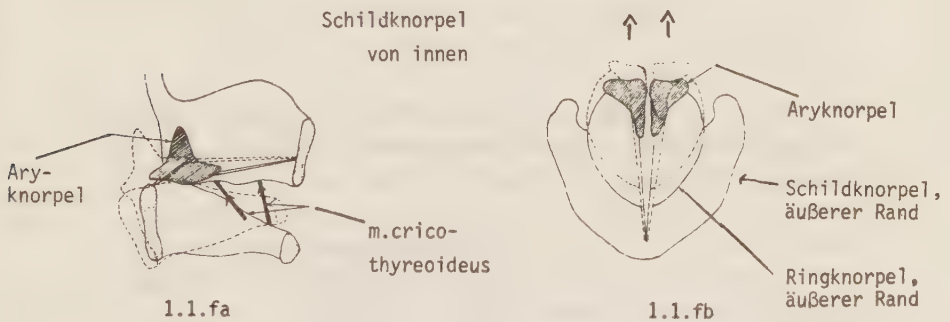


Abb. 1.1.f: Rotation des Ringknorpels im Cricothyreoid-Gelenk (1.1.fa) und daraus folgende Verlängerung der Stimmbänder (1.1.fb)
(nach Hardcastle 1976: 81)

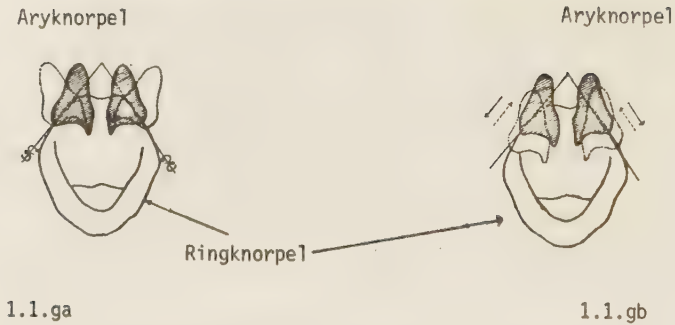


Abb. 1.1.g: Bewegungen der Aryknorpel im Cric-
arytaenoid-Gelenk
(nach Hardcastle 1976: 65)

Das Ergebnis der in Abb. 1.1.f dargestellten Rotation des Ringknorpels ist eine Verkleinerung des Cricothyreoid-Winkels und damit eine Verlängerung und Spannung der Stimmbänder. Verantwortlich für diese Bewegung ist in der Hauptsache die Aktion des *musculus cricothyreoideus* (Arnold 1961). Es können jedoch auch andere, von außen einwirkende Kräfte den Effekt der Verlängerung und auch der Verkürzung der Distanz zwischen *Processus vocalis* und vorderer Thyroid-Insertion der Stimmbänder haben (Zenker und Zenker 1960; Hardcastle 1976: 68-75; vgl. dazu auch weiter unten unter 1.3.3).

Die Bewegungen der Aryknorpel auf dem Ringknorpelrand werden mit "Schaukelbewegung" (rocking motion, Abb. 1.1.ga) und "Gleitbewegung" (gliding motion, Abb. 1.1.gb) bezeichnet (Sonesson 1958, 1970). In älteren Handbüchern, z.B. bei Pernkopf 1963: 335, wird als dritte Bewegung, die die Aryknorpel vollziehen können, noch die Rotation um die vertikale Achse angegeben. Sonesson (1958) und von Leden und Moore (1961) haben jedoch gezeigt, daß den Aryknorpeln diese dritte

Art der Bewegung nicht möglich ist (vergl. hierzu auch Sawashima 1970). Das Zusammenspiel der auf die Aryknorpel einwirkenden muskulären Kräfte bewirkt nach heutiger Auffassung vielfältige Kombinationen der "Schaukel-" und der "Gleitbewegung". Baken und Isshiki (1977) vergleichen die dafür verantwortlichen Muskelkräfte mit Vektoren. Adduktion und Spannungsänderungen der Stimmlippen als Resultat der Muskelaktionen sind demnach dem Produkt von nichtlinearen Transformationen gleichzusetzen.

1.1.4.3 Innere Kehlkopfmuskulatur

Die Wirkungsweise der inneren Kehlkopfmuskeln (Abb.1.1.h) besteht in der Drehung des Ringknorpels im Cricothyreoid-Gelenk, in der Bewegung der Aryknorpel und der isometrischen Kontraktion der Muskeln in den Stimmlippen selbst. Funktional lassen sie sich in Abduktoren, Adduktoren und Spanner bzw. Entspanner unterteilen. (Hardcastle 1976: 75 ff.).

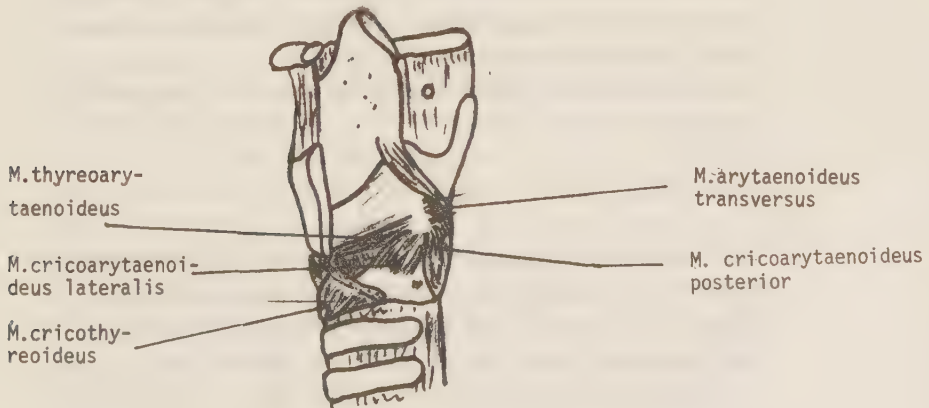


Abb.1.1.h Innere Kehlkopfmuskulatur
(nach Boenninghaus 1972:222)

Abduktormuskel:

Der einzige Abduktormuskel im Kehlkopf ist der phylogenetisch vergleichsweise junge *musculus cricoarytaenoideus posterior* (Negus 1931). Er verläuft zwischen der posterioren Fläche des Ringknorpels und der posterioren Oberfläche des *processus muscularis* der Aryknorpel. Durch seine Kontraktion wird am *processus muscularis* der Aryknorpel ein diagonaler Zug nach unten und zur Mitte hin ausgeübt und gleichzeitig der *processus vocalis* seitwärts gedreht und leicht angehoben. Das Resultat dieser "Schaukelbewegung" ist eine weit geöffnete Glottis (Broad 1973; Koike, Hirano und Morio 1976). Neben seiner Bedeutung für die Respiration wurde die Rolle des Postikus im Phonationsprozeß durch zahlreiche Untersuchungen nachgewiesen (Hiroto et al. 1967; Hirose und Gay 1972; Hirose 1975; Hirose und Ushijama 1978; Benguerel, Hirose und Sawashima 1978): Er wird verstärkt aktiv bei stimmlosen Plosiven und Frikativen, besonders in medialer und finaler Position, und reduziert seine Aktivität bei stimmhaften Lauten. Die Kontrolle über die Stimmhaftigkeit von Lauten wird dabei in feiner Abstimmung mit den antagonistisch aktiven *Interarytaenoidmuskeln* (*transversus* und *obliquus*) ausgeübt, die vom *musculus cricoarytaenoideus lateralis* unterstützt werden (Benguerel et al. 1978).

Adduktoren:

Die Funktion des *M.cricothyroideus lateralis*, ein kleiner, quadrilateral geformter Muskel, der tief im Schildknorpel liegt, ist in erster Linie die eines Antagonisten des *M.cricothyroideus posterior*, indem er die *processus vocales* der Aryknorpel zusammenzieht (Hardcastle 1976: 78) und dabei

gleichzeitig herunterdrückt (Smith 1970). Er kann jedoch auch andere Wirkungen haben: Einige seiner Faserbündel setzen am conus elasticus an und abduzieren daher bei ihrer Kontraktion die Stimm lippen (Kressner 1953; Wängler 1972: 77). Bei seiner adduzierenden Aktivität hat eine Erhöhung der isotonischen Kontraktion eine Vergrößerung der medialen Kompression (Broad in Minifie et al. 1973: 151) zur Folge; bei sehr starker Kontraktion und gleichzeitiger Inhibierung des Transversus rücken die Aryknorpelkörper auseinander und es entsteht das sogenannte Flüsterdreieck (Hardcastle 1976: 78; Wängler 1972: 90).

Der *M. cricoarytaenoideus transversus* ist der einzige unpaarige der inneren Kehlkopfmuskeln. Seine dicke, rechteckige Masse bedeckt mit ihren horizontalverlaufenden Fasern die gesamte dorsale Fläche der Aryknorpel. Er zieht die Aryknorpel hauptsächlich in ihrer Gleit-, teilweise auch in ihrer Schaukelbewegung zusammen und schließt dadurch die *pars intercartilaginea* der Glottis (Hardcastle 1976: 78). Auf den membranösen Teil hat seine Aktion keinen Einfluß (Koike et al. 1976). Als Antagonist des Postikus, wird er aktiv, wenn die Stimm lippen für stimmhafte Produktionen vibrieren sollen und er ist ebenfalls an der medialen Kompression beteiligt.

Der *M. arytaenoideus obliquus* liegt dem Transversus auf. Seine beiden Faserbündel verlaufen von der hinteren Fläche des *processus muscularis* bis zur Spitze des jeweils anderen Aryknorpels und kreuzen sich etwas oberhalb der Aryknorpelmitte (Wängler, 1972: 77). Er ist im wesentlichen ein Synergist des Transversus. Bei starker Kontraktion dieses Muskels werden die Vestibulum-Falten zusammengeführt zu einem partiellen Verschuß; dieser Mechanismus kann zur Bildung der sogenannten Taschenbandstimme führen (Hardcastle 1976: 78 f.).

Spanner:

Weil er der muskuläre Bestandteil der Stimmlippen ist, spielt der *M. thyreoarytaenoideus* für den Phonationsprozeß eine wichtige Rolle. Obwohl

er anatomisch als eine Einheit erscheint, wird der Muskel in zwei Teile unterschieden: Der *M. thyreoarytaenoideus externus* verläuft weiter außen zwischen der Innenseite des Schildknorpels und der lateralen Basisfläche der Aryknorpel, und der meistens als *M. vocalis* bezeichnete *M. thyreoarytaenoideus internus* verläuft medial vom Externus zwischen der Innenseite des Thyreoid-Winkels und dem processus vocalis (Wängler 1972: 75 f.)¹ Der Faserverlauf, vor allem des Vokalis ist sehr kompliziert. Goertlers Befunde (1950), nach denen ein Teil der Fasern direkt im ligamentum vocale inserieren soll, waren ein entscheidendes Argument für die Vertreter der neurochronaxischen Stimmbildungstheorie (Husson 1959). Andere histologische Untersuchungen (Wustrow 1952; van den Berg und Moll 1955, von Leden 1961, Rohen 1968) konnten Goertlers Ergebnisse allerdings nicht bestätigen. Aber sicherlich erlaubt die diverse, häufig mit einem komplizierten Zopfmuster verglichene (Rohen 1968) Anordnung seiner Fasern dem Muskel eine große Zahl von Variationsmöglichkeiten bei seinen Aktionen.

Wie alle inneren Kehlkopfmuskeln, mit Ausnahme des *M. cricothyreoideus*, gehört der *M. vocalis* zur Gruppe der schnellen Muskulatur (vergl. Sawashima 1970)².

Hinzu kommt seine reiche Innervation (Broad 1973), so daß der *M. vocalis* sehr gut für eine präzise Kontrolle über feine Spannungsänderungen in den Stimmlippen ausgerüstet ist (Arnold 1961).

¹Die funktionelle Differenz dieser beiden Muskeln ist allerdings noch nicht ganz geklärt (vergl. Broad 1973; MacNeilage 1973; Hardcastle 1976: 82)

²Schnelle Muskeln unterscheiden sich von langsamen dadurch, daß ihre Kontraktionszeit kürzer und die Fusionsfrequenz, d.h. die Stimulationsfrequenz, die eine tetanische Kontraktion des Muskels bewirkt, höher ist (Sawashima 1970).

Der Vokalis kann durch die Erhöhung der isometrischen Spannung synergistisch mit dem *M.cricothyreoideus* tätig sein (Arnold 1961, Hardcastle 1976: 80), d.h. die versteiften Stimmlippen vibrieren mit einer höheren Frequenz. In EMG-Untersuchungen wurde seine hohe Aktivität für stimmhafte Produktionen nachgewiesen, die allerdings je nach phonetischem Kontext differiert (Hirose 1977, Fujimura 1977, Hirose und Ushijama 1978). Eine weitere mögliche Aktion macht den Vokalis zum Antagonisten des *M.cricothyreoideus*: durch aktive isotonische Kontraktion kann er die Stimmlippen verkürzen und damit ihre Spannung und Vibrationsrate erniedrigen (Koike et al. 1976, Hardcastle 1976: 80).

Die Funktionen des *M. thyreoarytanoideus externus* entsprechen denen des *M.vocalis*, wobei er in der Hauptsache als Entspanner der Stimmlippen wirkt, indem er die Aryknorpel in ihrer "Schaukelbewegung" nach vorn zieht und dadurch die Stimmlippen verkürzt (Kressner 1953, Broad 1973; Hardcastle 1976: 82). Möglicherweise kann er zusätzlich noch den Vokalis bei der Erhöhung der isometrischen Spannung unterstützen (Hardcastle 1976: 83).

Der *M. cricothyreoideus* nimmt aus zwei Gründen eine Sonderstellung unter den inneren Kehlkopfmuskeln ein: Erstens hat seine Kontraktion keine Bewegung der Aryknorpel zur Folge, sondern er bewirkt eine Drehbewegung von Ring- und Schildknorpel gegeneinander (siehe oben bei Abb. 1.f)³, und zweitens wird er als einziger innerer Kehlkopfmuskel nicht vom *N. laryngeus inferior* (*N.recurrens*), sondern vom *M. lar. superior* innerviert, ein Umstand, der bei Stimmlippenlähmungen eine große Rolle spielt.

³Die Aussagen darüber, welcher Knorpel bei dieser Rotation gedreht wird, und welcher von beiden fixiert bleibt, differieren (Isshiki und Ishikawa 1976). Hardcastle hält beide Möglichkeiten für gegeben (1976: 81), Arnold (1961) ist ebenso wie Wängler (1972: 79) und Zenker und Zenker (1960) der Auffassung, daß der Schildknorpel durch externe Muskeln und Bänder viel zu stark in seiner Position fixiert ist, als daß er durch den vergleichsweise kleinen *M.cricothyreoideus* bewegt werden könnte.

Die pars recta und die pars obliqua des Muskels verlaufen zwischen dem unteren Rand und der äußeren Oberfläche des Cricoid-Bogens und der rückwärtigen Oberkante bzw. dem cornu inferius des Schildknorpels (Hardcastle 1976: 81). Der als äußerer Stimmbandspanner bezeichnete Muskel ist für die Grobregulation der Spannung im liquamentum vocale bzw. den Stimmlippen verantwortlich. In seiner Funktion als Spanner ist er in der Sprechstimmlage wesentlich weniger aktiv als der Vokalis. Mit darüber hinausgehenden Vibrationsfrequenzen allerdings korreliert seine Aktivität systematisch (Faaborg-Andersen 1957, Arnold 1961; Koike et al. 1976; Zenker und Zenker 1960). Die Spannung der Stimmlippen durch den M. cricothyreoideus hat gleichzeitig einen adduzierenden Effekt (Arnold 1961). Bei extrem hoher Spannung, der eine sehr hohe Vibrationsrate der Stimmlippen-schwingung entspricht, hat seine Aktion einen abduzierenden Einfluß, der durch die Aktivität der Adduktoren ausgeglichen werden kann (Hardcastle 1976: 82).

Per definitionem gehören noch zwei weitere Muskeln zur inneren Kehlkopfmuskulatur, die aber hauptsächlich Sphinkterfunktionen ausüben. Ihr Einfluß auf den Phonationsprozeß ist, soweit geklärt, gering, (Hardcastle 1975: f.) Der M. thyroaryepiglotticus wirkt auf die aryepiglottischen Falten und verschließt, indem er die Epiglottis herunternimmt, das vestibulum laryngis. Die Fasern des M. aryepiglotticus verlaufen lateral von der Epiglottis. Der Muskel wird manchmal als eine Fortsetzung des Obliquus angesehen und daher als Synergist zu diesem Muskel. Primär verschließt er als Sphinkter das vestibulum laryngis.

In Abb. 1.1.i sind die Bewegungen der Aryknorpel und die daraus resultierenden Zustände der Stimmlippen am Kehlkopfpräparat und im laryngoskopischen Spiegelbild abschließend noch einmal dargestellt.

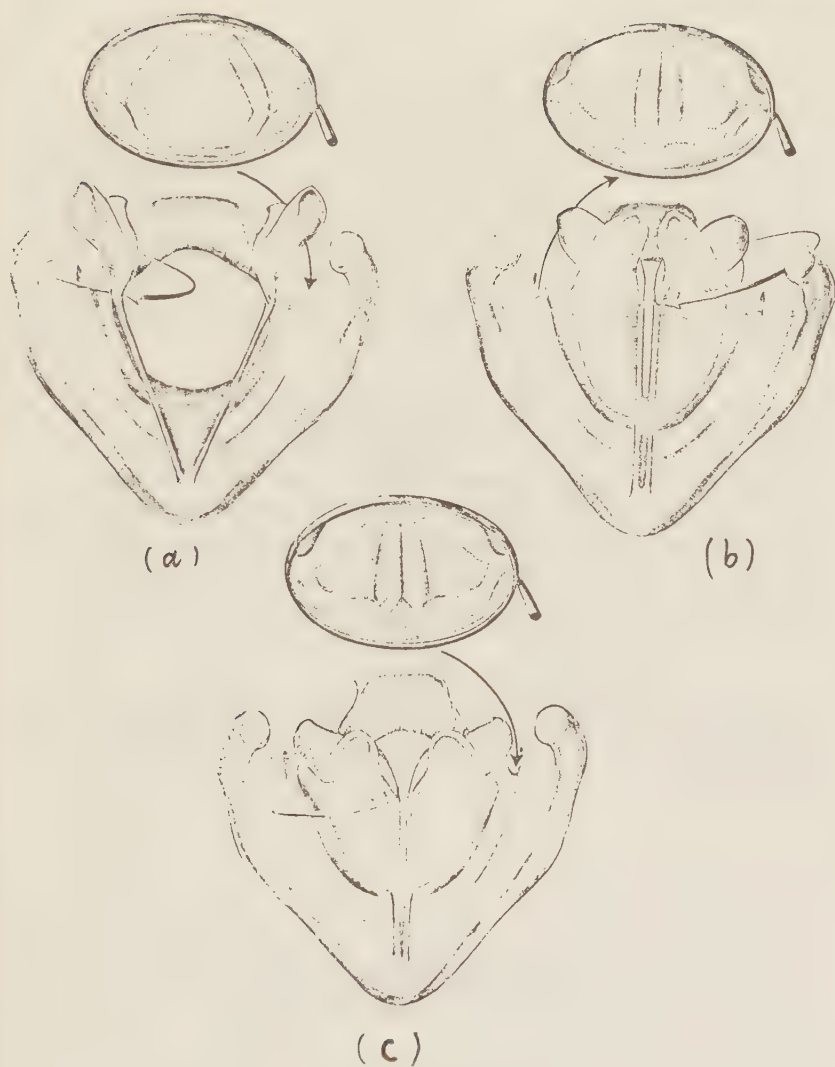


Abb. 1.1.i Glottisformen am Skelettpräparat und im Spiegelbild in der
Respirationsstellung (a), Phonationsstellung (b) und Flü-
sterstellung (c)
(nach Pernkopf 1963: 337)

1.1.4.4. Äußere Kehlkopfmuskulatur

Die äußere Kehlkopfmuskulatur (Abb. 1.1.k) verbindet den Larynx mit dem Schultergürtel, dem Brustbein, dem Zungenbein und über dieses mit dem Schädel. In Abb. 1.1.e sind schematisch die Wirkungen der wichtigsten äußeren Kehlkopfmuskeln dargestellt, die nahezu immer Lageveränderungen des Kehlkopfes nach sich ziehen. Man teilt sie in die Gruppe der oberen Zungenbeinmuskeln oder Larynxanheber und die Gruppe der unteren Zungenbeinmuskeln oder Larynxsenker ein (Wängler 1972: 79 ff.; Hardcastle 1976: 69 ff.). Einige für die Phonation wichtigen Aspekte dieser Muskelaktionen sollen im folgenden erläutert werden.

Eine Anhebung des Larynx führt zur Verkleinerung des supraglottalen Raumes und damit zur Erhöhung des supraglottalen Drucks, der beispielsweise bei der Produktion von stimmlosen Verschlusslauten notwendig sein kann, um den Aufbau einer genügend großen transglottalen Druckdifferenz und somit Stimmlippenschwingungen zu verhindern (Hardcastle 1976: 69). Umgekehrt sind die Verhältnisse, wenn bei der Produktion von stimmhaften ungespannten Verschlusslauten der Larynx erniedrigt wird (Hardcastle: 74).

Deutlich erhöht wird der Larynx bei der Produktion von Ejektiven, und mit stark erniedrigter Larynxposition werden Implosive gebildet (Ladefoged 1973).

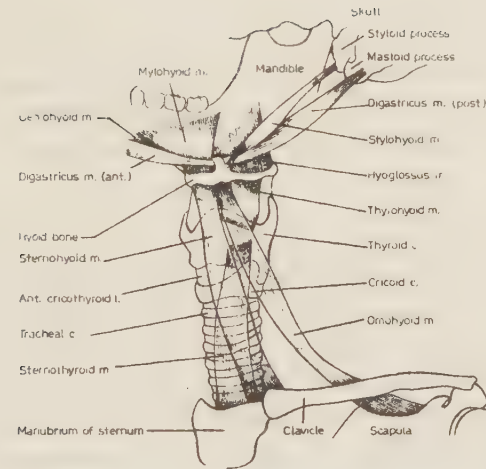


Abb. 1.1.k Äußere Kehlkopfmuskeln von der Seite
(nach Lumby 1977)

Nicht ganz eindeutig sind die Zusammenhänge zwischen vertikaler Larynxposition und Grundfrequenz (vergl. Sawashima 1970). Im allgemeinen geht man von der schon seit längerer Zeit bekannten Tatsache aus, daß Larynxhöhe und Grundfrequenz positiv miteinander korrelieren (Scripture 1902: 266; Ship 1975; Hardcastle 1976: 70, 74).

Das heißt, daß eine Larynxerhöhung bzw. -senkung eine Verkleinerung bzw. Vergrößerung des Cricothyreoidwinkels zur Folge hat (vergl. Abb. 1.). Die Funktionen der äußeren Kehlkopfmuskulatur sind dabei allerdings im Einzelnen noch nicht geklärt (vergl. Sawashima 1970, 1974; Harris 1974). So haben z.B. Hirano, Ohala und Vennard (1969) gezeigt, daß der zur Gruppe der Larynxsenker gehörende M.sternohyoideus sowohl bei niedrigeren als auch bei hohen Grundfrequenzen vermehrte Aktivität zeigt. Für die Auswirkung der Aktivität eines weiteren Larynxsenkers, des M.sternothyreoides, ist nach Soninnen (1956) der augenblickliche Zustand des Systems ausschlaggebend: In Abhängigkeit von der Position des Kopfes und des Rückgrades kann er den Schildknorpel entweder nach hinten oder nach vorn ziehen.

Ein anderer wichtiger Senker der Grundfrequenz ist nach Zenker und Zenker (1960) der M.cricopharyngeus. Nach ihrer Auffassung wirkt der Muskel als ausgesprochener Antagonist zum M. cricothyreoides, indem er dem Ringknorpel ein Drehmoment erteilt, so daß die Lamina nach vorn kippt und die Stimmlippen verkürzt werden (siehe dagegen aber Miningerode 1967). Inzwischen sind allerdings Zweifel daran aufgetaucht, daß Grundfrequenzsenkungen aktiv durch äußere Mechanismen hervorgerufen werden. Nach Harris (1974) ist dafür eher ein einfaches Nachlassen der Spanneraktivitäten verantwortlich.

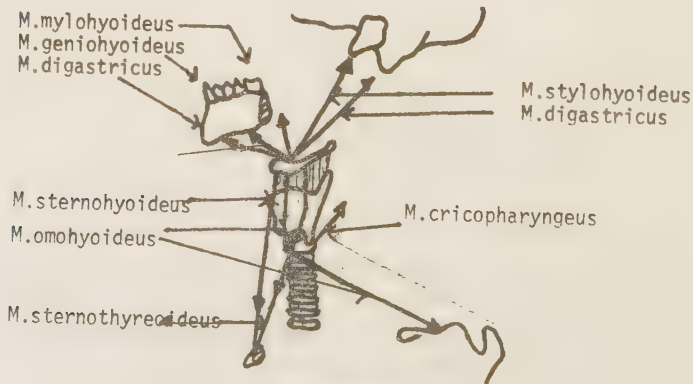


Abb. 1.1.e Wirkung der wichtigsten äußeren Kehlkopfmuskeln
(nach Wängler 1972: 87)

Die oben erwähnte einfache Beziehung zwischen Larynxposition und Grundfrequenz gilt offenbar nur für Frequenzbereiche, die außerhalb der habituellen Sprechstimme liegen. Die Sprechstimmlage, auch "Ruheposition des Systems" genannt, (Arnold 1961) befindet sich am unteren Ende der Stimmskala. Für diesen Bereich ist elektromyographisch nur wenig Aktivität der äußeren Kehlkopfmuskeln nachweisbar (Zenker und Zenker 1960), und die Änderungen der Larynxposition, die bei zusammenhängendem Sprechen feststellbar sind, stehen nach Messungen an Sprechern von Tonsprachen in keiner systematischen Beziehung zur Grundfrequenz (Gandour und Maddieson 1976; Painter 1976).

Ein weiteres Problem wirft der Zusammenhang zwischen Kehlkopfposition und dem "intrinsic pitch" von Vokalen auf. Nach Lehiste (1970:68 ff) haben [i] und [u] den höchsten "intrinsic pitch". Aber [i] wird mit der relativ höchsten und [u] mit einer relativ niedrigen Larynxposition artikuliert. Diese auf den ersten Blick widersprüchlich erscheinende Tatsache kann nach Ohala (1977) auf die folgende Weise physiologisch erklärt werden: Die Aktivität der äußeren Kehlkopfmuskeln beeinflusst nicht allein die Spannung der Stimmlippen in anterior-posterior-Richtung. Ihre Kontraktion kann sich über den Zug des Bindegewebes auch auf die vertikale Spannung in den Stimmlippen übertragen (Ohala 1972, 1977; vergl. auch Hardcastle 1976: 70). Faaborg- Andersen und Vennard (1964) haben bei der Produktion von hohen Vorder- und Hinterzungenvokalen hohe Aktivität im M.mylohyoideus festgestellt, der das Zungenbein und die Zungenwurzel nach oben schiebt. Wie bereits aus Untersuchungen von van den Berg (1955) hervorgeht, überträgt sich diese Veränderung der Zungenposition auf die vertikale Spannung in den Stimmlippen: Die Größe der Larynxventrikel, die als repräsentativ für vertikale Spannungsverhältnisse angesehen werden kann, verringert sich in Abhängigkeit von der folgenden Ordnung der Vokale: u, i, e, o, a. Als Konsequenz dieser Aktion vibrieren die vertikal gespannten und versteiften Stimmlippen ungeachtet der relativen Larynxposition bei

[u] und bei [i] am schnellsten. Nach einer Untersuchung von Ewan (1977) betreffen die Veränderungen des "intrinsic pitch" nicht nur die Vokale sondern auch deren lautliche Umgebung aufgrund von Koartikulationsmechanismen: Die Grundfrequenz von Nasalen ändert sich in Abhängigkeit vom folgenden Vokal.

1.1.4.5 Innervation

Die inneren Kehlkopfmuskeln werden von zwei Ästen aus dem N.vagus versorgt. Der N.laryngeus superior zweigt im oberen Halsteil vom N.vagus ab und teilt sich in den motorischen Ramus externus, der den unteren Schlundschnürrer und den M.cricothyreoideus versorgt, und den sensiblen R.internus, der die membrana thyreoidea durchbohrt und die Schleimhaut des Kehlkopfes oberhalb der Glottis innerviert. Eine Anastomose verbindet ihn mit dem N.laryngeus inferior (Benninghoff und Goertler Bd.3: 329) (Vergl. Abb. 1.1.n).

Der N.laryngeus recurrens zweigt im unteren Halsraum vom N.vagus ab und tritt in den Brustraum ein. Auf der rechten Seite schlingt er sich um die Arteria subclavia, links um den Aortenbogen, und steigt rückläufig in der Rinne zwischen Trachea und Oesophagus zum Kehlkopf hoch. Sein Endast, der N.laryngeus inferior, teilt sich in einen hinteren und vorderen Zweig. Er versorgt alle inneren Kehlkopfmuskeln mit Ausnahme des M.cricothyreoideus. Der N. recurrens wird dadurch zum "Stimmnerv" (Benninghoff und Goertler Bd. 3: 330). Durch seinen tiefreichenden Verlauf ist der Nerv, besonders auf der linken Seite, Schädigungen durch raumgreifende Prozesse und operative Eingriffe im Mediastinum ausgesetzt, und ist auf gleiche Weise im Halsbereich gefährdet, wo er direkt hinter der Schilddrüse verläuft (vergl. Abb. 1.1.m).

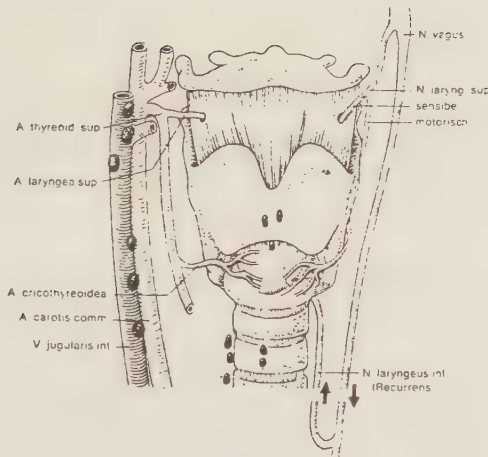


Abb. 1.1.m Gefäße (rechte Seite) und Nerven (linke Seite)
des Kehlkopfes
(nach Boenninghaus 172:225)

Die nervöse Versorgung der äußeren Kehlkopfmuskulatur ist weniger einheitlich als die der inneren. Bei den für diese Arbeit untersuchten Patienten war sie intakt, und daher soll an dieser Stelle der Hinweis genügen, daß die äußeren Kehlkopfmuskeln von verschiedenen Ästen der Nn.hypoglossus, facialis und trigeminus innerviert werden (Wängler 1972: 205).

1.1.4.6 Regulation der Aktivitäten im Larynx

Obwohl der Verlauf der Kehlkopfnerfen verhältnismäßig eindeutig beschreibbar ist, werfen die laryngealen Innervationsverhältnisse eine Reihe von Problemen auf: Neben der Frage nach einer möglichen Doppelinnervation durch beide Kehlkopfnerfen (Wirth 1974), z.B. des *M.cricothyreoideus* (Arnold 1961) oder des *M.transversus* (Kressner 1953), wird die Sonderstellung des *N.recurrens* als ausschließlich motorischem Nerv bestritten (Jeschek 1956; Dunker 1968; Sawashima 1970; Wyke und Kirchner 1975; Wyke 1976; Mallard, Ringel und Horii 1978). Die Implikationen dieser Annahme sind für den Phonationsprozeß von großer Bedeutung, da afferente Nervenimpulse die Voraussetzung für ein komplexes reflektorisches Steuerungssystem bei der Phonation sind.

Nach Hussons neurochronaxischer Stimmbildungstheorie (Husson 1956, 1959) wird die Grundfrequenz der Stimmlippenvibrationen durch Impulse über den *N.recurrens* kontrolliert, die eine aktive "coup-pour-coup" - Initiierung jeder Öffnungsbewegung der Stimmlippen durch Kontraktionen des *M.vocalis* bewirken. Die Nervenimpulse entstammen dabei unterschiedlichen Hirnebenen in Abhängigkeit davon, welcher Grad an willkürlicher Aufmerksamkeit der Regulation der Phonationsfrequenz zugrunde liegt. Hussons Theorie und deren Vorannahmen sind in vieler Hinsicht widerlegt worden (u.a. van den Berg und Moll 1955; van den Berg 1958; Rubin 1960; Rohen 1968; Dunker 1969), und die aerodynamisch - myelastische Stimmbildungstheorie (van Berg 1958) gilt als allgemein akzeptiert (Hardcastle 1976: 83). Danach wird die Vibrationsfrequenz der Stimmlippen durch folgende interdependente Faktoren bestimmt: Kraft des subglottalen Drucks, aerodynamische Gesetzmäßigkeiten, Spannung, Masse und Elastizität der Stimmlippen. Ergebnisse aus neueren neurophysiologischen Untersuchungen weisen auf die Bedeutung gerade der letztgenannten, laryngealen Faktoren bei der Kontrolle der Phonation hin, wobei muskuläre Aktivitäten und Verhältnisse im Larynx durch verschiedene Regelkreissysteme kortikal und subkortikal gesteuert werden (Sawashima 1970).

Nach Wyke (Wyke und Kirchner 1975; Wyke 1976) werden drei neuromuskuläre Kontrollsysteme im Larynx während der Phonation unterschieden, die in der Zeit nacheinander wirksam werden: Die präphonatorische Abstimmung ("tuning") der Stimmlippen, bei der 50 bis 100 msec vor der Erzeugung des zur Phonation notwendigen Luftstroms die Aktivität der Adduktoren verstärkt und die des Postikus reduziert wird (Faaborg-Andersen 1965; Hiroto et al. 1967), bringt die Stimmlippen in Phonationsstellung und reguliert ihre Spannung und Masse. Dieser Prozeß läuft willkürlich ab.

Nach Phonationsbeginn setzt sofort die reflektorische Stabilisation der Stimmlippen ein, bei der ein integrierter Komplex von unbewußten reflektorischen Prozessen aktiv wird und während des Phonationsgeschehens bleibt. Durch diese Prozesse wird der zuvor hergestellte Zustand der Stimmlippen den Kräften der Expirationsluft gegenüber aufrecht erhalten. Die Rückmeldung über die Verhältnisse in den Stimmlippen erfolgt dabei über Mechanorezeptoren⁴ in der Mucosa, in den inneren Kehlkopfmuskeln und in den Gelenken der Kehlkopfknorpel. Das Zusammenwirken dieser mucosalen, myotatischen und artikulären Stabilisierungsmechanismen erfolgt zwar unbewußt und wird im unteren Hirnstamm gesteuert, aber die operationale Effizienz dieser Mechanismen kann durch Trainings- bzw. Therapieprogramm erhöht werden (Wyke 1976).

⁴Die wichtigsten unter den Mechanorezeptoren sind Muskelspindeln, die es nach klassischer Auffassung allerdings nur in der Skelettmuskulatur, nicht aber in der von Cranialnerven innervierten Muskulatur geben soll. Nachdem aber ihre Existenz für den äußeren Augenmuskel nachgewiesen wurde, war diese Auffassung zweifelhaft geworden (Sawashima 1970), und man geht inzwischen davon aus, daß Propriozeptoren sie die Muskelspindel in der Larynxmuskulatur angesiedelt sind und eine wichtige Funktion in der myodynamischen Kontrolle beim Sprechen haben (Hardcastle 1976: 17).

Schließlich erfolgt postphonatorisch die akustische Steuerung durch cochleare Selbststimulation, aufgrund derer, wenn nötig, die Effekte der präphonatorischen und stabilisierenden Prozesse korrigiert werden können. Diese auditive Rückkoppelung geschieht willkürlich, Wyke hält aber zusätzlich ein direkter operierendes cochleo-laryngeales Reflexsystem für möglich, das unabhängig von der Perzeption der eigenen Stimme durch den Sprecher arbeitet (Wyke 1976).

Ähnlich wie Wyke betont Schoultz-Coulon (1976) die Bedeutung der propriozeptiven laryngealen Reflexmechanismen, die bei Sängern so weit trainiert werden können, daß sie einen beabsichtigten Ton trotz auditorischer Maskierung treffen. Nach den Ergebnissen von Mallard, Ringel und Horii (1978) ist es denkbar, daß nicht ausgebildete Individuen für Phonationsfrequenzen oberhalb der habituellen Sprechstimm-lage zwar auf die auditorische Rückkoppelung angewiesen sind, daß aber bei der Steuerung der Grundfrequenz in Intonationsverläufen beim Sprechen diese periphere Kontrolle nicht mehr notwendig ist.

1.2 Phonation

1.2.1 Vorgänge im Larynx

1.2.1.1 Methoden

Die Bewegungen der Stimmlippen verlaufen als ein dreidimensionales Ereignis in einem der direkten Beobachtung nur schwer zugänglichen Raum. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgänge im Larynx während der Phonation ist daher keine triviale Aufgabe. Zu ihrer Lösung werden eine Reihe von Methoden eingesetzt, von denen die wichtigsten hier genannt werden sollen: Seit der Erfindung des Kehlkopfspiegels durch Garcia (1855) ermöglicht die indirekte Laryngoskopie die visuelle Inspektion der Stimmlippen während der Phonation. Durch den Einsatz des Stroboskops werden dabei noch mehr Details der Stimmlippenvibration beobachtbar (Schönhärl 1963). Noch weitergehende Informationen über Einzelheiten der Stimmlippenschwingung ergeben sich aus Hochgeschwindigkeitsfilmen (Farnsworth 1940; Timcke, von Leden und Moore 1958, 1959; Moore und von Leden 1958; von Leden, Moore und Timcke 1960),

deren Bilder neuerdings digital ausgewertet werden (Koike und Hirano 1973; Koike 1976; Davis 1976; Childers, Paige und Moore 1976). Auch elektroglottographische und photoelektroglottographische Untersuchungen (Sonesson 1960; Kitzing und Sonesson 1974) ermöglichen Aussagen über laryngeale Vorgänge während der Phonation.⁵

Weitere Möglichkeiten, zu Aussagen über die Ereignisse im Larynx während der Phonation zu kommen, ergeben sich aus Experimenten mit Larynxmodellen. Dabei wird entweder mit natürlichen Modellen, d.h. Kehlköpfen von Menschen oder Hunden gearbeitet (z.B. Smith 1955; Rubin 1963), oder mit künstlichen. Letztgenannte werden neuerdings mit Hilfe von digitalen Verfahren hergestellt. Neben dem vereinfachten "Zwei-Massen-Modell" (Ishizaka und Matsudaira 1972; Ishizaka und Flanagan 1977; Flanagan und Ishizaka 1978) wurde dabei ein weitergehendes, aber auch wesentlich komplizierter handhabbares "Multi-Massen-Modell" vorgeschlagen (Titze 1973, 1974, 1976; Titze und Strong 1975).

Natürlich sind durch Simulationen der Phonation im Modell bisher nur sehr vereinfachende Annäherungen an das Verhalten der Stimmlippen unter verschiedenen Bedingungen erbracht worden. Allerdings ermöglichen gerade die digitalen Larynxmodelle, bei denen Parameter wie die Stellung und die Spannung der Stimmlippen oder die Kraft des subglottalen Drucks kontrolliert veränderbar sind, die Klärung von Grundfragen, die beispielsweise auch die pathologische Phonation betreffen (vergl. o. unter 2.3.2).

⁵Zur Kritik dieser Methoden vergl. Sawashima 1970; zur Kritik der Elektroglottographie insbesondere Lecluse, Brocaar und Verschuure 1975.

Schließlich sind an dieser Stelle noch die mit "inversem Filtern" bezeichneten Verfahren der Signalverarbeitung zu nennen. Die Rekonstruktion des im Larynx erzeugten Signals wird dabei auf zwei verschiedene Weisen vorgenommen: Bei der ersten werden die Einflüsse des Ansatzrohres dadurch ausgeschaltet, daß der Sprecher in eine reflexionslose Röhre phoniert (Sondhi 1975; Momsen und Engebretson 1977). Um hierbei korrekt vorzugehen, müssen sich allerdings die Länge der Röhre und die des jeweiligen Ansatzrohres entsprechen (Davis 1976: 105). Das Prinzip der zweiten Art von inversem Filtern besteht darin, die Formanten auf der Grundlage von mathematischen Ansatzrohrmodellen zu entfernen (Miller 1959; Holmes 1962; Rothenberg 1972). Dabei wird explizit die Annahme zugrunde gelegt, daß das Ansatzrohr und die Signalquelle bezüglich ihrer akustischen Eigenschaften linear trennbar sind. Interaktionen zwischen Quelle und System, die auftreten können, wenn z.B. die Grundfrequenz der Stimmlippenschwingung nahe bei einer der Resonanzfrequenzen des Ansatzrohres liegt (van Berg 1958), werden in diesem Modell also nicht berücksichtigt (Flanagan 1972: 245). Das geschieht mit der Begründung, daß diese Interaktionen selten auftreten, weil die Impedanz der Glottis so viel höher ist als die des Ansatzrohres, daß der Larynx als das einzige, den glottalen Luftstrom kontrollierende Organ angesehen werden kann (Rothenberg 1972; vergl. auch Ungeheuer 1962: 37).

Ergebnisse aus Untersuchungen, die mittels der erwähnten Methoden durchgeführt worden sind, führen zu Aussagen über die Funktion des Larynx als Schallquelle bei der Produktion von stimmhaften Lauten. Der Larynx soll in dieser Funktion im folgenden näher beschrieben werden.

1.2.1.2 Bewegungen der Stimmlippen

Wenn durch die Aktivität der unter 1.3.2 beschriebenen Muskeln die Stimmlippen in Phonationsstellung gebracht worden sind und der subglottale Druck genügend groß geworden ist, wird der Glottisschluß gesprengt. Zu Anfang, wenn die Geschwindigkeit des Luftvolumens gering

ist, bleibt der Druck zwischen den Stimmlippen groß genug, um sie noch weiter auseinander zu führen. Bei weiterer Öffnung der Glottis und genügend großer Volumen-Geschwindigkeit wird der intraglottale Druck negativ, und es entsteht ein Sog⁶. Gleichzeitig nimmt, weil Luft durch die Glottis entweicht, der subglottale Druck ab. Zusätzlich streben die Stimmlippen durch die Wirkung der elastischen Kräfte in ihnen wieder in ihre Ruheposition (van Berg 1958). So werden durch Sog, Druckabnahme und Spannung die Stimmlippen wieder zusammengeführt.

Das Öffnen und Schließen der Glottis geschieht quasiperiodisch, so daß der Luftstrom in eine Reihe von aufeinanderfolgenden Pulsen verwandelt wird (Broad 1973), deren Volumengeschwindigkeit (Luftvolumen pro Sekunde) eine Quelle akustischer Erregung für den Vokaltrakt darstellt. Die Volumengeschwindigkeit hängt ab von der Glottisweite (Flanagan 1958), aber auch die Bewegungen der mucosa beeinflussen den Luftstrom bei jedem Vibrationszyklus (Holmes 1977).

Die Stimmlippen öffnen und schließen sich mit einer vertikalen Phasenverschiebung, wobei der untere Bereich ("untere Stimmlippe") dem oberen Bereich ("obere Stimmlippe") vorangeht und mit einer größeren Amplitude als dieser nach lateral ausgelenkt wird (van den Berg 1958; Timcke, von Leden und Moore 1958). In digitalen Larynxmodellen (Ishizaka und Matsudaira 1972; Ishizaka und Flanagan 1977; Flanagan und Ishizaka 1978) wird die vertikale Phasenverschiebung dadurch simuliert, daß jede Stimmlippe durch zwei aneinandergekoppelte Massen repräsentiert wird (vergl. Abb. 1.2.a). Die beiden Massen können sich unabhängig voneinander bewegen. Jede Masse hat ihre

⁶Die hier wirksamen aerodynamischen Kräfte folgen dem Bernoulli'schen Gesetz, einer vereinfachten Beschreibung der Konservation von Energie (Broad 1973). Die Bernoulli'sche Gleichung $p + \frac{1}{2} \rho u^2 = \text{konst.}$,

bei der p der Luftdruck, ρ die Luftdicke und u die Strömungsgeschwindigkeit ist, besagt, daß das Gleichgewicht zwischen potentieller und kinetischer Energie höheren Druck bei kleinen und niedrigeren Druck bei großen Geschwindigkeiten fordert.

eigene Spannung ("stiffness") s_1 und s_2 , und die Kopplungskraft ("mechanical coupling force") k_c verbindet die beiden Massen mechanisch miteinander, r_1 und r_2 sind Dämpfungskonstanten. Wenn der subglottale Druck als externe Kraft auf die Massen angreift, bewirken s_1 und s_2 ein Zurückbewegen jeder Masse in ihre Ruheposition und k_c stellt die relative Ruheposition der Massen zueinander wieder her. Der subglottale Druck wirkt zuerst auf die unteren Massen ein und trennt sie. Danach bewegen sich die oberen Massen schnell auseinander, worauf der Druck auf die unteren abrupt sinkt. Sog und elastische Kräfte führen sie daraufhin wieder zusammen, das gleiche geschieht danach mit den oberen Massen. Eine Erhöhung von k_c bewirkt weniger Bewegung der Massen relativ zueinander, eine Erhöhung von s_1 und s_2 hat eine Verringerung der Vibrationsamplitude zur Folge. Die aerodynamischen Kräfte des Systems müssen größer sein als die mechanischen, damit Vibrationen auftreten können.

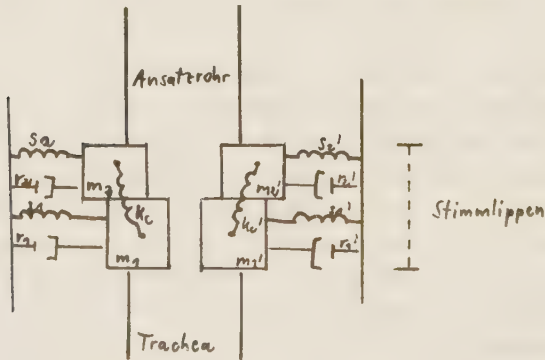


Abb. 1.2.1 Schematisches Diagramm eines Zwei-Massen-Stimmritzen-Modells (nach Ishizaka und Matsudaira 1972)

Die vertikale Phasenverschiebung ist typisch für Männerstimmen bei Phonation in Sprechstimmlage (van den Berg 1958), in der die Stimmlippen entspannt sind, das ligamentum vocale kurz ist, und die mucosa lose aufliegt. In höheren Stimmlagen und manchmal auch bei Frauenstimmen scheinen sich die Stimmlippen eher wie eine einzige schwingende Masse zu verhalten (Monsen und Engebretson 1977).

Neben den vertikalen kommt es aufgrund der ungleichen Verteilung von Masse und Spannung in den Stimmlippen in anterior-posterior Richtung (Smith 1970) auch zu horizontalen Phasenverschiebungen (van den Berg 1958). Zusätzlich werden die Stimmlippen im Strom der Expirationsluft leicht nach oben geblasen (Hardcastle 1976: 84).

Die membrana mucosa vollzieht während der Phonation wellenförmig nach außen verlaufende Eigenbewegungen⁷, ihre Beweglichkeit hängt aber von den elastischen Verhältnissen in den Stimmlippen ab (Hirano 1974): Bei starken Cricothyreoid-Kontraktionen für hohe Stimmlagen bewegt sich die Mucosa der in ihrer gesamten Länge gestreckten und gespannten Stimmlippen nicht mehr, bei entspannten Stimmlippen in Sprechstimmlage ist sie dagegen frei beweglich und trägt zu einer längeren Verschußzeit und zu einer abrupteren Öffnung der Glottis während des Vibrationszyklus bei (Fujimura 1977).

⁷ Diese Bewegungen werden nach Schönhärl (1963) "Randkantenverschiebung" genannt. Auf ihre Bedeutung für die Phonation wurde schon früher hingewiesen (Smith 1957); für Perello sind sie die Grundlage einer "muco-ondulatorischen Stimmbildungstheorie" (Perello 1962).

1.2.1.3 Eigenschaften des modulierten Luftstroms

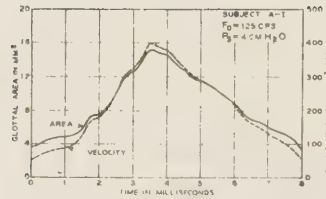
Die Eigenschaften der Stimmlippenschwingung und damit auch die Funktion der Volumengeschwindigkeit verändern sich in Abhängigkeit von den Phonationsparametern, Intensität, Grundfrequenz und Phonationstyp. Um die Funktion der Volumengeschwindigkeit beschreiben zu können, muß sie mit Hilfe von mathematischen Verfahren aus dem Sprachsignal bestimmt werden. Eine andere Möglichkeit, die Eigenschaften des modulierten Luftstroms zu beschreiben, ist die Untersuchung der Funktion der glottalen Querschnittsfläche ("glottal area function"), die als relativ gute Repräsentation der Volumengeschwindigkeitsfunktion gilt (Flanagan 1958; Minifie 1973). Die Funktion der Glottisfläche ist auf Hochgeschwindigkeitsfilmen, zumindest ohne digitale Hilfsmittel, allerdings nicht einfach zu bestimmen. Daher wird oft mit der Funktion der Glottisweite ("glottal width function") gearbeitet, die, zumindest bei gesunden Sprechern der Funktion der Glottisfläche ähnlich ist (Koike und Hirano 1973).

Wenn die Funktion der Glottisfläche in der Zeit zusammen mit dem subglottalen Druck bestimmt wird, ergibt sich ein reziprokes Verhältnis zwischen den beiden Funktionen: Wenn bei geschlossenen Stimmlippen die Funktion der Glottisfläche den Wert 0 hat, erreicht der subglottale Druck sein Maximum (Koike und Hirano 1973). Weitere Eigenschaften der Glottisflächen-Funktion als Zeitsignal werden durch Quotienten erfaßt, deren Werte sich in Abhängigkeit von den Phonationsparametern ändern. Der Öffnungsquotient ("open quotient", OQ) bezeichnet das Verhältnis zwischen der Dauer eines ganzen Vibrationszyklus und der Zeit, während der die Glottis dabei geöffnet ist (Timcke, von Leden und Moore 1958). Aus der Elektrotechnik stammt der äquivalente Terminus "duty cycle" (Flanagan 1958; Minifie 1973). Der Geschwindigkeitsquotient ("speed quotient", SQ) wird bestimmt aus dem Verhältnis zwischen Abduktions- und Adduktionsphase, und schließlich führten Kitzing und Sonesson (1974) noch den Maßquotienten ("rate quotient"; RQ) ein, als das Verhältnis von Verschußphase und Abduktionsphase zur Adduktionsphase.

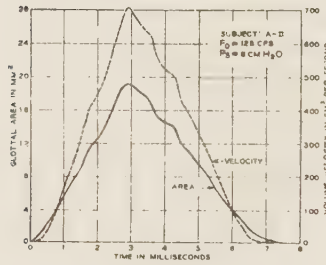
Die Eigenschaften der Glottisflächenfunktion im Frequenzbereich erklären sich aus der Tatsache, daß sie bei durchschnittlich lauter Phonation in Sprechstimmlage annähernd eine Dreiecksform hat, die Voraussetzungen eines idealen Dreiecks aber nie erfüllt (Flanagan 1972: 48). Eine Fourier-Analyse der Glottisflächenfunktion ergibt somit ein obertonreiches Spektrum, das irregulär verläuft und durch zahlreiche Minima oder spektrale Nullstellen gekennzeichnet ist. Der für die sprachliche Kommunikation relevante Bereich liegt zwischen 300 und 4000 Hz, der größte Anteil spektraler Energie ist auf den Bereich unterhalb 300 Hz konzentriert (Holmes 1977). Die Amplituden der höheren harmonischen Komponenten stehen in einem inversen Verhältnis zur Frequenz. Ein Abfall von 12 dB pro Oktave oberhalb 1000 Hz (Flanagan 1958; Minifie 1973) ist ein Näherungswert, der in Abhängigkeit von den Parametern der Phonation und vom Geschlecht des Sprechers variiert (Monsen und Engebretson 1977).

In Abb. 1.2.b sind typische, von einem männlichen Sprecher gewonnene Funktionen der Volumengeschwindigkeit und der Glottisfläche gezeigt. Unter der ersten Bedingung wurde der Vokal mit möglichst niedriger Grundfrequenz möglichst leise geäußert. Dabei ist die Flächenfunktion flach, die Glottis schließt niemals ganz, der OQ ist dementsprechend maximal groß, d.h. gleich 1. Unter der zweiten Bedingung wurde der gleiche Vokal bei gleicher Grundfrequenz mit erhöhter Intensität produziert. Die Flächenfunktion verläuft steiler und hat eine Zeit lang den Wert 0, d.h. der OQ ist verringert. Ein auf diese Weise produzierter Laut hat eine höhere Effizienz, die Amplitude der höher frequenten Komponenten im Spektrum ist in Relation zur ersten Bedingung vergrößert.

Abb. 1.2.c stellt das Amplitudenspektrum der Flächenfunktion von Abb. 1.2.bb dar.



(a)



(b)

Abb. 1.2.b "glottal area function" und Volumengeschwindigkeitsfunktion bei leiser (a) und bei lauter (b) Phonation (nach Flanagan 1972:49)

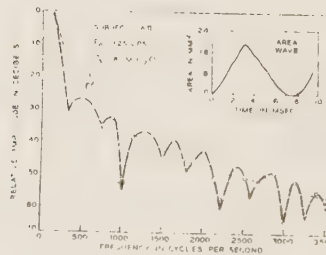


Abb. 1.2.c Amplitudenspektrum der Funktion in Abb. 1.2.bb (nach Flanagan 1972: 49)

1.2.2 Mechanismen im Ansatzrohr

1.2.2.1 Quellen akustischer Erregung

Neben der Erregung des Ansatzrohres durch quasiperiodische Impulse, die konstituierend für stimmhafte Laute sind, gibt es noch zwei weitere Quellen akustischer Energieerzeugung, und zwar Rauschquellen und transiente Quellen (Flanagan 1972: 53 ff.).

Erlaubt das Ansatzrohr dem Luftstrom eine relativ freie Passage bis auf eine Konstriktion an einer im Prinzip beliebigen Stelle, geht mit der steigenden Geschwindigkeit des Luftstroms durch die Konstriktionsstelle der laminare Strom in einen turbulenten über, sobald die kritische Reynold'sche Zahl überschritten wird (Fant 1970: 273).⁸

Die Wirbel des turbulenten Stroms erzeugen einen zufällig fluktuierenden Druck und werden damit zur akustischen Quelle eines statistischen Rauschens. Dieser Mechanismus ist die Grundlage der Frikativproduktion bzw. der Produktion von geflüsterten Lauten, bei denen der Luftstrom innerhalb des Larynx, meistens im sogenannten Flüsterdreieck, in einen turbulenten Strom transformiert wird.

Wenn die Konstriktion innerhalb des Vokaltraktes zu einem kompletten Verschuß wird, entstehen transiente Laute ("pressure release sources" werden nach Heinz (1974) diese Schallquellen genannt):

⁸ In die Berechnung dieser dimensionslosen Größe gehen ein die Partikelgeschwindigkeit v , der Durchmesser der Passage h , und die Konstante $\nu = 0.15 \text{ cm}^2/\text{sec}$, die definiert ist als das Verhältnis zwischen Viskositätskoeffizient und Gasdichte. Die Reynold'sche Zahl Re ergibt sich aus der Formel

$$Re = \frac{v \cdot h}{\nu}$$

(Fant 1970: 273; Heinz 1974; vergl. auch Isshiki, Yanagihara und Morimoto 1966)

Bei konstant gehaltenem subglottalen Druck und freier Passage des Luftstroms durch den Larynx erreicht der Druck unterhalb des Verschlusses den Wert des subglottalen Drucks. Nach abrupter Lösung des Verschlusses fließt aufgrund des Druckgefälles eine große Luftmenge, die zunächst aus turbulentem, später, mit abnehmender Geschwindigkeit aus laminarem Strom besteht, in die Teile des Vokaltraktes oberhalb der Konstriktion (Flanagan 1972: 56). Diese aus der Plosionsphase des Konsonanten resultierende Luftmenge erzeugt einen transienten Impuls akustischer Erregung für den Vokaltrakt.

1.2.2.2 Modifikation des Signals

Sprachlaute, bei deren Produktion einer oder eine Kombination dieser Erregungsmechanismen zugrunde liegt, werden in ihren akustischen Eigenschaften modifiziert, bevor sie das Ohr des Hörers erreichen und zwar durch die Übertragung durch den Vokaltrakt bzw., bei Nasal-lauten, durch die Nasenräume, und zusätzlich durch die Radiation von Mund und Nase. Die Übertragungsfunktion des Vokaltraktes ist definiert als das Verhältnis zwischen Volumengeschwindigkeit am Mund und Volumengeschwindigkeit an der Glottis als Funktion der Frequenz (Heinz 1974). Die Eigenschaften der Übertragungsfunktion hängen von der Konfiguration des Vokaltraktes ab, dessen Resonanzfrequenzen (Formantfrequenzen) die ihnen naheliegenden Frequenzbereiche des Quellensignals verstärken. Nasalisierte Laute sind zusätzlich durch Antiresonanzen gekennzeichnet (Fujimura 1962). Die Radiation ist definiert als das Verhältnis von Schalldruck beim Hörer zur Volumengeschwindigkeit an den Lippen bzw. der Nase als Funktion der Frequenz. Die Eigenschaften der Radiation verändern sich mit der relativen Position des Hörers zum Sprecher und mit der Frequenz, aber sie sind unabhängig vom jeweils produzierten Sprachlaut (Heinz 1974).

In Abb. 1.2.d ist schematisch dargestellt, wie aus der Kombination von Signalquelle, Übertragung und Radiation das Sprachsignal entsteht, das den Hörer erreicht.

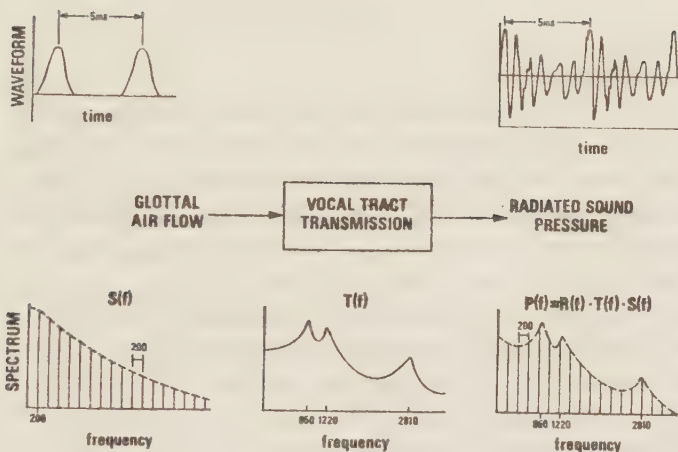


Abb. 1.2.d Entstehung des akustischen Sprachsignals;
 obere Reihe: Zeitbereich, untere Reihe: Frequenzbereich
 (nach Heinz 1974)

Dargestellt ist die Produktion des Vokals [a] mit einer Grundfrequenz von 200 Hz , der typisch für einen weiblichen Sprecher sein könnte. In der oberen Reihe sind das glöttale Erregungssignal und das am Mund resultierende Schalldrucksignal im Zeitbereich dargestellt. Die untere Reihe zeigt die Signale im Frequenzbereich. Der Erregungsimpuls hat eine Grundschiwingung bei 200 Hz und harmonische Komponenten bei Vielfachen von 200 Hz . Die Übertragungsfunktion des Vokaltraktes zeigt Formantfrequenzen, die wegen des relativ kürzeren weiblichen Ansatzrohres etwas höher liegen, als dies bei einem männlichen Sprecher der Fall sein würde. Ausgehend vom linearen Ansatzrohrmodell ergibt sich das Frequenzspektrum des abgestrahlten Schallsignals als Produkt aus dem Quellensignal, der

Vokaltrakt-Transferfunktion und dem Radiationsfaktor (Heinz 1974).

1.3 Laryngeale Kontrolle von Intensität, Grundfrequenz und Stimmhaftigkeit

1.3.1 Interrelation der Parameter

Charakteristisch für Patienten mit pathologisch veränderter Larynxfunktion ist die eingeschränkte Kontrollmöglichkeit über die Parameter der Phonation Intensität, Grundfrequenz und Phonationstyp. Wenn die laryngeale Kontrolle über diese Parameter bei gesunden Sprechern im folgenden getrennt beschrieben wird, ist diese Trennung künstlich und nur aus Gründen der Übersichtlichkeit gerechtfertigt. Zwei Hinweise sollen die Interrelation der Phonationsparameter verdeutlichen: Eine Intensitätserhöhung ist verbunden mit der Erhöhung der Luftstromrate durch die Glottis. Dies aber bewirkt eine Veränderung der aerodynamischen Verhältnisse, so daß, zumindest bei nicht trainierten Personen, die Grundfrequenz ebenfalls ansteigt (van den Berg 1958). Wenn andererseits die Grundfrequenz im Bereich der Sprechstimmlage sinkt, kann ein Wechsel im Phonationstyp auftreten, indem die verkürzten, entspannten Stimmlippen "creaky voice" produzieren (Fujimura 1977).

1.3.2 Kontrolle der Intensität

Variationen der Intensität stehen in einer direkten Beziehung zu Änderungen des SQ und des RQ und in einem inversen Verhältnis zum OQ (Timcke, von Leden und Moore 1958; Sonesson 1960; Kitzing und Sonesson 1974). Die Amplitude der Volumengeschwindigkeit erhöht sich bei Intensitätssteigerungen, ohne daß sich die laterale Exkursion der Stimmlippen und damit die Glottisfläche in gleicher Weise verändern muß (Hollien und Colton 1969; Flanagan 1972: 14). Bei leisen Stimmen ist der spektrale Energieabfall steiler als bei lauten (Monsen und Engebretson 1977).

Damit für Intensitätssteigerungen der Druck unterhalb der Glottis genügend groß werden kann, muß sich der glottale Widerstand erhöhen (Okamura, Gould Tanabe 1976). Hollien und Colton (1969) beschreiben eine Verdickung der Stimmlippen bei Intensitätserhöhungen, Hirano, Vennard und Ohala (1970) stellten verstärkte Aktivitäten in den mm. vocalis und lateralis fest und reduzierte Cricothyreoideus-Aktivität bei Schwelltönen. Allerdings scheint die laryngeale Kontrolle nur bei niedrigen Tönen dominant zu sein, für hohe Frequenzen ist offenbar die Luftstromrate, die durch die Respirationsmuskulatur kontrolliert wird, das Regulativ der Intensität (Isshiki 1964, 1965; Dunker 1969; Okamura, Gould und Tanabe 1976).

Van den Berg (1956, 1962; Schuttke und van den Berg 1976a) leitete aus der Beziehung zwischen den auf die Stimmlippen einwirkenden Kräften und dem mit Mikrophon abgenommenen Schalldruck ein Maß für die Effizienz der Stimme her, die bestimmt wird aus dem Verhältnis vom Schalldruck zum Produkt aus mittlerem subglottalen Druck und mittlerer Strömungsrate. Pathologisch veränderte Stimmen haben aufgrund der Erhöhung der Strömungsrate bzw. des subglottalen Drucks in Relation zu gesunden Sprechern und zum posttherapeutischen Zustand eine wesentlich weniger effiziente Stimme, und die Effizienz von trainierten Sängerstimmen übersteigt die von nicht ausgebildeten Stimmen.

1.3.3 Kontrolle der Grundfrequenz

Während bei Erhöhungen der Vibrationsrate der Stimmlippen der SQ sich nicht systematisch ändert, verringert sich der RQ und der OQ wächst, bis bei hohen Frequenzen die Stimmlippen nicht mehr schließen (Timcke, Moore und von Lenden 1958, Sonesson 1960, Kitzing Sonesson 1974). Mit steigender Grundfrequenz verringert sich die Vibrationsamplitude (Hollien, Gould und Johnson, 1976) und der spektrale Energieabfall wird größer (Momsen und Engebretson 1976).

Die Grundfrequenz variiert als Funktion von mehreren laryngealen Faktoren, die die Spannung, Elastizität und Masse der Stimmlippen verändern und damit den glottalen Widerstand gegen die Kräfte der Expirationsluft (Rubin 1963; Hixon et al 1970; Okamura, Gould und Tanabe 1976). Longitudinale Spannungsänderungen der Stimmlippen werden durch Veränderungen ihrer Länge relativ zur Ruheposition erzeugt und korrelieren positiv mit der Vibrationsfrequenz. Bezüglich der absoluten Länge der Stimmlippen in Ruheposition ist die Relation allerdings umgekehrt: Die langen Stimmlippen von Männern vibrieren langsamer als die von Frauen, und zwar wegen ihrer größeren Masse (Arnold 1961; Broad 1973). Für die Verlängerung der Stimmlippen ist hauptsächlich der M. cricothyreoideus verantwortlich, der von den Adduktoren unterstützt wird (Arnold 1961, Hirano, Vennard und Ohala 1970). Mit steigender longitudinaler Spannung werden die Stimmlippen dünner, wodurch sich die Masse der schwingenden Anteile verringert (Hollien, 1962). Gleichzeitig werden sie steifer, d.h. immer weniger stark deformierbar, und dadurch erhöht sich ihre Elastizität (Hirano 1974).

Die muskuläre Spannung innerhalb der Stimmlippen wird durch den M. vocalis verändert, indem er sie durch isometrische Kontraktion erhöht und dabei synergetisch zum M. cricothyreoideus tätig ist (Arnold 1961). Die durch seine isotonische Kontraktion verkürzten und verdickten Stimmlippen vibrieren dagegen wegen der verringerten Spannung langsamer (Hardcastle 1976; Fujimura 1977). Als ein weiterer, die Grundfrequenz erhöhender Faktor, wird die mediale Kompression angeführt, bei der durch verstärkte Lateralis - und Transversuskontraktion die pars intercartilaginea der Glottis fest verschlossen wird. Dieser Verschluß überträgt sich auf die membrösen Teile der Glottis so, daß eine Art von "Kapodaster-effekt" entsteht, durch den die in ihrer Masse reduzierten Stimmlippen mit einer höheren Vibrationsrate schwingen (van den Berg und Tan 1959; Broad 1973). Eine Grundvoraussetzung für diesen Effekt ist m.E. allerdings, daß sich bei der medialen Kompression die longitudinale Spannung der Stimmlippen nicht verändert.

Vieles spricht dafür, daß die oben angeführten laryngealen Mechanismen sich nur in den Frequenzbereichen in der beschriebenen Weise ver-

halten, die mit Modalregister⁹ bezeichnet werden; in den äußersten Extrembereichen des menschlichen Stimmumfangs, in denen die Stimmlippen entweder maximal gespannt oder maximal entspannt sind, werden Grundfrequenzänderungen von anderen Faktoren, nämlich von Aktivitäten der Respirationsmuskulatur kontrolliert.

Im Pulsregister¹⁰ vibrieren die entspannten, dicken und kurzen Stimmlippen (Hollien, Moore, Wendahl und Michel, 1966) mit Vibrationsfrequenz zwischen 20 und 90 Hz (Broad 1973). Charakteristisch ist eine sehr kurze Verschußphase und eine impulsartige Funktion der Glottisfläche (Hollien, Girard und Coleman 1977).

⁹Die drei Stimmregister (Pulsregister, Modalregister und Falsett) unterscheiden sich nach Hollien (1976) ausschließlich durch andersartige Vorgänge im Kehlkopf. Sänger- oder Resonanzregister stellen einen zweiten, nicht laryngealen Registersatz dar. Dieser Hinweis soll hier genügen, weil eine ausführliche Diskussion des Registerbegriffes den Rahmen dieser Arbeit verlassen würde.

¹⁰Die Termini pulsation, vocal fry, laryngalisation und creaky voice werden auf verschiedene Weise gleichbedeutend verwandt oder unterschieden (Ladefoged 1973, Broad 1973; Hardcastle 1976: 83). Sie sollen hier folgendermaßen definiert sein: pulsation bzw. vocal fry bezeichnet ein Stimmregister, das unterhalb der normalen Sprechstimmlage liegt (Hollien et al. 1966), und Laryngalisation bzw. creaky voice gelten als Phonationstyp, bei dem nur der ligamentöse Teil der Stimmlippen in verschiedenen Frequenzen vibrieren kann (Ladefoged 1973), wobei die Dauer aufeinanderfolgender Grundperioden unregelmäßig ist.

Die Cricothyreoid-Aktivität ist im Pulsregister gering oder gar nicht feststellbar, die Aktivität des Vocalis ist im Vergleich zum Modalregister erhöht (Ship und McGlone 1971). Der subglottale Druck ist relativ groß, die Luftstromrate gering (Murry 1971). Änderungen der Vibrationsfrequenz innerhalb des Pulsregisters korrelieren weder mit der Länge noch mit der Dicke der Stimmlippen systematisch (Hollien, Damsté und Murry 1969).

Auch im Falsett ("loft register"), in dem nur die medialen Ränder der maximal gespannten Stimmlippen in der Regel ohne Glottisschluß schwingen, ist nach vielen Autoren kein systematischer Zusammenhang zwischen Erhöhung der Muskelaktivität, der Spannung und der Vibrationsfrequenz mehr erkennbar (Arnold 1961, Hollien und Moore 1960; Hollien und Colton 1969), und die Respirationsmuskulatur reguliert die Luftstromrate und damit die Grundfrequenz der Stimmlippenschwingung (Hirano, Vennard und Ohala 1970).

1.3.4 Kontrolle der Stimmhaftigkeit

Laryngeale Aktivitäten regulieren die verschiedenen Arten der glottalen Konstriktion so, daß auf dem Kontinuum zwischen völligem glottalen Verschluß und ganz geöffneter Glottis (Gandour 1975) verschiedene Grade von Stimmhaftigkeit angesiedelt werden können, die nach Ladefoged's Modell (1973) kategorisiert werden als "stimmlos" - "geflüstert" - "breathy" oder "murmur" - "stimmhaft" - "creaky" oder "Laryngalisation". Ladefoged unterscheidet zusätzlich noch verschiedene Grade von "breathy voice" und "creaky voice" und stellt an den Anfang des Kontinuums die Bezeichnung "spread" für die maximale Öffnung der Glottis bei der Inspiration und an das Ende den glottalen Verschlußlaut ? für den engsten Verschluß.

Durch den unterschiedlichen Grad der Distanz zwischen den Aryknorpeln und, damit zusammenhängend, durch das verschiedene Ausmaß der Beteiligung der Stimmlippen an der Vibration wird der Luftstrom im Larynx bei den verschiedenen Phonationstypen in charakteristischer Weise modifiziert.

Während für die eigentliche stimmlose Phonation die Glottis so weit geöffnet ist, daß kein phonetisch relevanter Laut mehr produziert wird (Broad 1973), rücken die Aryknorpel zur Flüsterstellung so weit zusammen, daß der Luftstrom aus der Lunge bei genügend grosser Geschwindigkeit turbulent wird. Für diese laryngeale akustische Rauschquelle sind verschiedene Arten der glottalen Öffnung beobachtet worden und davon am häufigsten das sogenannte Flüsterdreieck, bei dem die gespannten Stimmlippen einander genähert sind bis auf eine relativ weite Öffnung zwischen den Aryknorpeln, durch die der meiste Teil des turbulenten Luftstroms fließt (Broad 1973).

Beim "breathy voicing" ist die Distanz zwischen den Aryknorpeln auf 91 % im Verhältnis zur stimmlosen Phonation reduziert (Ladefoged 1973), und die vorderen Teile der Stimmlippen schwingen, ohne jedoch ganz zu schließen. So passiert sowohl turbulenter als auch quasiperiodisch modulierter Luftstrom den Larynx. "Breathy voicing" kann angesehen werden als die Bezeichnung für ein Kontinuum zwischen reiner Stimmhaftigkeit und reinem Flüstern (Broad 1973).

Für die im engen Sinn stimmhafte Phonation ist die Distanz zwischen den Aryknorpeln noch weiter verringert, und zwar auf etwa 75 % relativ zur Stimmlosigkeit (Ladefoged 1973). Die Stimmlippen sind in ihrer gesamten Länge an der Schwingung beteiligt. Bei der Laryngalisation bzw. "creaky voicing" stehen die Stellknorpel so eng zusammen, daß nur der ligamentöse Teil der Stimmlippen schwingt. Im Unterschied zur normal stimmhaften Phonation weisen bei dieser Schwingungsform benachbarte Perioden große Unterschiede in ihrer zeitlichen Dauer auf, indem alternierend kurze und lange Perioden produziert werden oder in der Länge zufällig variierende Grundperioden aufeinander folgen (Broad 1973).

Die verschiedenen Phonationstypen dienen teilweise der Etablierung phonologischer Oppositionen¹¹; außerdem können "creaky voice"

¹¹Neben der stimmlos-stimmhaft Opposition gibt es z.B. im Gujirati und anderen indischen Sprachen den Gegensatz zwischen rein stimmhaften und mit breathy voice artikulierten Vokalen (Firth 1969)

und "breathy voice" zur habituellen Phonation eines Sprechers werden (Broad 1973). Diese beiden Phonationstypen sind an die laryngeale Grundfrequenz insofern gekoppelt, als in höheren Tonlagen die Glottis nicht mehr schließt und die Phonation breathy wird; bei fallenden Tönen oder schnell fallender Intonation z.B. am Ende von Deklarationssätzen ist dagegen die Tendenz zur Laryngalisierung groß (Broad 1973). Laryngalisierte Phonation ist allerdings auch in höheren Frequenzen möglich, wenn der äußere Stimmbandspanner die longitudinal entspannten Stimmlippen - die Aryknorpel bewegen sich nach vorn, wenn sie zusammenrücken - verlängert (Ladefoged 1973).

In Abb. 1.3.1 sind die Zeitsignale eines in verschiedenen Phonationstypen produzierten [a] wiedergegeben.

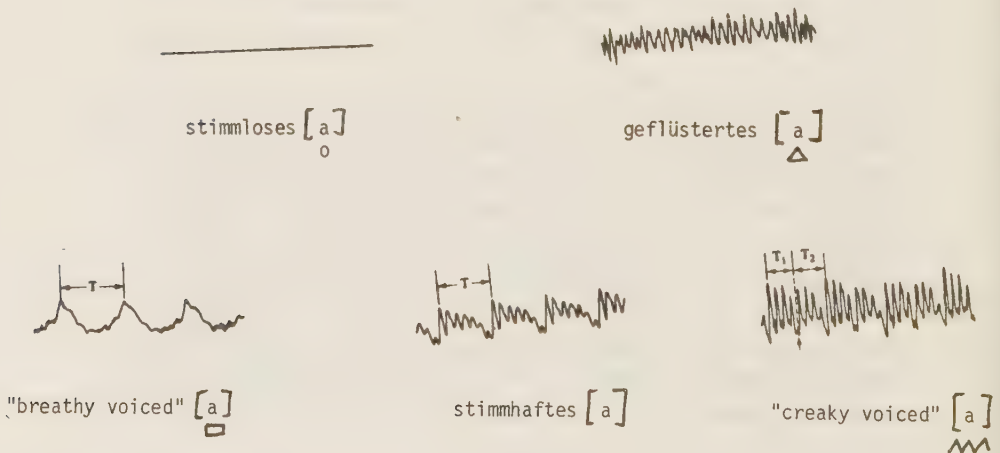


Abb. 1.3.a Zeitsignale eines in verschiedenen Phonationstypen produzierten [a] (nach Broad 1973)

Während die stimmlose Produktion praktisch keine Energie aufweist, ist zufälliges Rauschen charakteristisch für den geflüsterten Vokal. Beim breathy voicing ist die periodische Schwingung von einer Rauschkomponente überlagert. Fant (1970: 267) nennt diese unvollständige periodische Modulation eine "Energieverschwendung", die in der Intensitätsverringerung der oberen harmonischen Komponenten zum Ausdruck kommt. Bei der stimmhaften Phonation ist die Dauer der aufeinanderfolgenden Grundperioden maximal - wenn auch niemals vollständig (Fant 1970: 17) - regelmäßig. Der spektrale Energieabfall eines mit "creaky voice" produzierten Lautes ist im allgemeinen weniger steil als der eines im engen Sinn stimmhaft produzierten (Monsen und Engbretson 1977).

1.4 Zusammenfassung

Im ersten Kapitel wurden die Sprechorgane beschrieben mit besonderer Berücksichtigung der Anatomie und Physiologie des Larynx. Danach wurde die Aktion der Stimmlippen bei der Phonation dargestellt zusammen mit den akustischen Eigenschaften des daraus resultierenden Signals. Anschließend wurden die Möglichkeiten, die Verhältnisse im Larynx zu variieren geschildert, die der gesunde Sprecher hat, und mit Hilfe derer er die Intensität, die Grundfrequenz und den Grad an Stimmhaftigkeit bei der Phonation steuern kann. Die akustischen Eigenschaften des Sprachsignals verändern sich in Abhängigkeit von diesen Parametern.

Im folgenden sollen die Modifikationen dargestellt werden, die im Larynx aufgrund von einseitigen Stimmlippenlähmungen festgestellt werden können. Die Phonation ist unter dieser pathologischen Bedingung in charakteristischer Weise verändert und ebenso die Eigenschaften des Sprachsignals. Die akustischen Verfahren, mit deren Hilfe diese Veränderungen darstellbar bzw. meßbar sind, werden dabei im Einzelnen beschrieben.

2. Störungen der Phonation durch einseitige Stimmlippenlähmungen

2.1 Beschreibung und Ursachen der Schädigung

Die Patienten, deren Stimmen in der vorliegenden Arbeit analysiert werden, unterzogen sich einer Stimmtherapie, weil bei ihnen eine periphere, einseitige Rekurrensparese diagnostiziert worden war, d.h. eine Funktionsbeeinträchtigung des Nerven, der alle inneren Kehlkopfmuskeln mit Ausnahme des M. cricothyreoideus innerviert.

Der Verlauf des N. recurrens, und dabei besonders des linken Nerven, macht die Ursachen seiner Schädigung verständlich (s.o. 1.3.4). Als Komplikation nach chirurgischen Eingriffen wird sie am häufigsten nach Schilddrüsenoperationen beobachtet (Hirose 1977b). Nach Schacht, Krämer, Gross und Versmold (1972) beträgt die Wahrscheinlichkeit einer Rekurrensparese nach Strumaresektion 1.9 bis 5.6%. Die Zahlenangaben von Petroni et al. (1978) und Gabriel und Chilla (1978) bewegen sich in derselben Größenordnung. Bei Rezidiveingriffen an der Schilddrüse erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer Rekurrensparese als Operationsfolge auf 25 o/o (Schacht et al., 1972). Dabei kann der Nerv durchtrennt oder gequetscht werden, was zu einer irreversiblen Lähmung führt, oder seine Funktion wird durch postoperative Narben-, Serom-, oder Hämatombildung beeinträchtigt. Diese Schädigung ist im Allgemeinen reversibel (Poszgoj, Heckenast und Vincze 1967). Auch die Struma selbst kann auf den Nerven drücken. Weitere Ursachen sind Lungenerkrankungen wie Tuberkulose und Bronchialkarzinome (Titche 1976), wobei die Rekurrensparese ein spätes Symptom ist. Neuritiden im Zusammenhang mit grippalen Infekten, Herz- und Gefäßerkrankungen bilden weitere Ursachen. Außerdem kann die Lähmung idiopathisch sein (Hirose 1977), eine Erscheinung, die außer beim Menschen nur noch beim Pferd beobachtet wird (Cook 1970). In der letzten Zeit finden sich vermehrt Hinweise auf Rekurrensschädigungen infolge von Intubationsnarkosen (Ellis und Pallister 1975; Minuck 1976).

2.2 Strukturelle Modifikationen im Larynx

2.2.1 Position der gelähmten Stimmlippe

Charakteristisch für eine Rekurrensparese ist die Positionsfixierung der paretischen Stimmlippe, bei der im allgemeinen zwischen Paramedian- und Intermediärstellung unterschieden wird (siehe Abb. 2.2.a). Nach

Jeschek (1958) kommen auch Median-, Prälateral- und Lateralstellungen vor, sie sind aber äußerst selten. Außerdem findet sich gelegentlich die Bezeichnung schlaaffe bzw. straffe Lähmung. Dabei entspricht in der Regel die straffe Lähmung der Paramedianstellung und die schlaaffe der Intermediärstellung (Böhme 1974: 91).

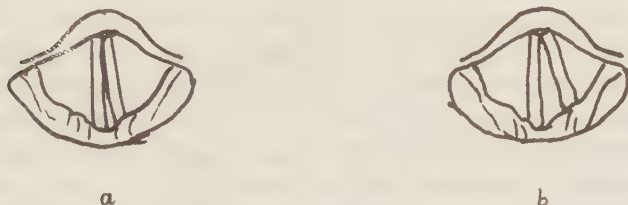


Abb. 2.2.a Stellungen der gelähmten Stimmlippe;
a Paramedianstellung, b Intermediärstellung

Das Zustandekommen der verschiedenen Positionen bzw. eines plötzlichen Wechsels zwischen ihnen ist noch nicht geklärt (Luchsinger/Arnold 1970: 369), und die Aussagen zu diesem Problem sind so divergent, daß Wirth (1974: 328) zu der Feststellung kommt, "daß man fast jede Aussage über laryngeale Innervation und Stimmlippenstellung entweder bestätigen oder widerlegen kann, indem man aus der früheren Literatur zitiert."

Das "Semon-Rosenbach'sche Gesetz", nach dem auf eine anfängliche Paramedianstellung aufgrund einer isolierten Postikulähmung allmählich eine Lähmung aller Rekurrenzweige mit Einstellung der Stimmlippe in Intermediärstellung folgt, gilt heute jedenfalls als widerlegt, weil auch der umgekehrte Ablauf beobachtet wird (Jeschek 1958; Böhme 1974: 90).

Bei einigen Autoren (Jeschek 1958; Lakatos 1974; Lakatos und von Stuckrad 1975) wird die Paramedianstellung dadurch erklärt, daß allein der N. recurrens ausgefallen ist, der N. laryngeus superior hingegen noch oder wieder intakt ist, so daß der M. cricothyreoideus spannend und damit adduzierend wirken kann. Einer Intermediärstellung entspricht nach dieser Auffassung der Ausfall beider Kehlkopfnerven, wobei der N. laryngeus superior auch später, durch retrograde Degeneration betroffen sein kann (Hofer 1953). Die spannende und adduzierende Funktion des M. cricothyreoideus hebt auch Arnold (1961) hervor, sie führt aber

offensichtlich nicht in allen Fällen zu einer Paramedianstellung. Auch Intermediärstellungen werden bei intaktem M. cricothyreoideus beobachtet (Kirchner 1977). Wird der M. cricothyreoideus in einem solchen Fall anaesthetisiert, ist das intermediär fixierte Stimmband schlaffer, sein Schwingungsverhalten unregelmäßiger (Hiroto 1976).

Abgesehen von den Einflüssen des äußeren Kehlkopfspanners sehen daher viele Autoren partielle Innervationsstörungen und damit partielle Ausfälle der Kehlkopfmuskeln als verantwortlich für die verschiedenen Stellungen der gelähmten Stimmlippen an (Wirth 1974; Full-Scharrer 1974; Hiroto 1976; Baken und Isshiki 1977). Danach entspricht der klinisch als "Postikusparese" bezeichneten Paramedianstellung bei teilweise erhaltener Funktionstüchtigkeit der Adduktoren, in erster Linie ein Ausfall des m. cricoarytaenoideus posterior, dessen Vulnerabilität im Vergleich zu den übrigen inneren Kehlkopfmuskeln als sehr groß gilt (Hirose 1977b). Bei einer Intermediärstellung sind zusätzlich alle Adduktoren beeinträchtigt.

Die Verhältnisse werden dadurch kompliziert, daß individuelle Gegebenheiten eine große Rolle spielen, und zwar sowohl die individuelle Verschiedenheit der motorischen Innervationsverhältnisse (Luchsinger und Arnold 1970: 369), als auch anatomische Unterschiede im Bau der Kehlkopfknorpel (Kressner 1953; Zenker und Zenker 1960): Je waagrechter die Ary-Gelenkfläche des Ringknorpels verläuft, umso weiter nähert sich das Stimmband einer medianen Stellung, und je steiler sie abfällt, umso eher ist eine Intermediärstellung zu erwarten.

Rückschlüsse auf Ort und Art der Schädigung sind somit aus der Stellung der gelähmten Stimmlippe nicht eindeutig zu ziehen. Wirth (1974) empfiehlt daher, anstelle von einer "Rekurrensparese" oder einer "Parese des N. lar. superior" lediglich von einer "Stimmlippenlähmung" zu sprechen, und sich auf eine Beschreibung der Stellung und der Form der gelähmten Stimmlippe und des Ausmasses der Motilitätsstörung zu beschränken.

Neben der Positionsfixierung der gelähmten Stimmlippe kommt es zu weiteren strukturellen Modifikationen im Larynx, die aus der Darstellung in Abb. 2.2b ersichtlich sind.



Abb. 2.2.b

Schematische Illustration der strukturellen Modifikation im Larynx und des Luftstromes bei einseitiger Stimmlippenlähmung links (nach von Leden und Moore 1961a)

Der subglottale Raum ist auf der paretischen Seite abgeflacht (von Leden und Moore 1961a; Böhme und Schmutzler 1966; Neumann und Kruse 1974), die Morgagni'schen Ventrikel sind häufig erweitert und vertieft (Isshiki und Isshikawa 1976). In vielen Fällen ist die gelähmte Stimmlippe aufgrund von atrophischen Veränderungen dünner und scharfkantiger als die gesunde (von Leden und Moore 1961a; Isshiki und Isshikawa 1976). Bei Atrophie der muskulären Anteile besteht die Gefahr der "Kadaverstellung"¹² der gelähmten Stimmlippe, ist. Häufig entwickeln sich dann Niveauunterschiede zwischen den beiden Stimmlippen. In der Regel steht dabei die gelähmte Stimmlippe bei der Inspiration tiefer und bei der

¹² Die Bezeichnung "Kadaverstellung" wird nach Wirth (1974) sehr uneinheitlich verwendet und ist nach Böhme (1974: 91) unzutreffend, weil eine typische Stellung der Stimmlippen am Leichenkehlkopf gar nicht existiert.

Phonation höher als die gesunde (von Leden und Moore 1961a; Smith 1970). Nach Isshiki und Isshikawa (1976) steht die gelähmte Stimmlippe umso höher, je weiter ihre Position von der Medianlinie entfernt ist. Allerdings sind bei schlaffen Lähmungen auch Niveauerniedrigungen beobachtet worden (Böhme und Schmutzler 1965; Neumann und Kruse 1974).

2.3 Die Phonation bei Stimmlippenlähmungen

2.3.1 Klinische Befunde

Stimmlippenschwingungen im pathologisch veränderten Larynx sind durch häufige und schnelle Wechsel im Vibrationsmuster gekennzeichnet (von Leden, Timcke und Moore 1960), die durch einen unvollständigen Glottisschluß und durch Unterschiede in der Masse und der Spannung der beiden Stimmlippen hervorgerufen werden. Bei einseitigen Stimmlippenlähmungen schwingt die gelähmte Stimmlippe mit (Jeschek 1958; von Leden, Timcke und Moore 1960; von Leden und Moore 1961a; Johannsen und Pascher 1976). Dabei werden ihre Schwingungen durch die der gesunden ausgelöst, indem sich deren Bewegungen direkt auf die gelähmte Stimmlippe oder auf die Luft innerhalb der Glottis übertragen (von Leden und Moore 1961a). Die gelähmte Stimmlippe folgt der gesunden mit einer großen Variabilität in der Phase und der Amplitude. Dadurch werden die Stimmlippenschwingungen asymmetrisch. Die vorwiegend horizontal angreifende Luftbewegung kann eine fast ausschließlich vertikale Schwingung hervorrufen, (Luchsinger/Arnold 1970 : 370), das sogenannte "Durchschlagen" der gelähmten Stimmlippe (Full-Scharrer 1974).

Abgesehen von den Unterschieden in der Stellung, der Spannung, der Form und dem Niveau zwischen gesunder und gelähmter Stimmlippe kann der Phonationsprozeß zusätzlich durch kompensatorische Bewegungen der gesunden Stimmlippe über die Medianlinie hinweg beeinflusst werden (von Leden et al. 1960, 1961; von Leden und Moore 1961). Außerdem wird die Aufhebung der mucosa-Bewegungen beobachtet (Full-Scharrer 1974; Johannsen und Pascher 1976). Nach Fex (1970) läßt sich aus der Wiederkehr der Randkantenverschiebung auf eine Rückkehr der Nervenfunktion schließen.

2.3.2 Simulation pathologischer Schwingungen

Die pathologische Asymmetrie der Stimmlippenschwingungen zeigt sich bei Paramedianstellungen immer (Full-Scharrer 1974). Mit diesem stroboskopischen Befund stimmen die Ergebnisse aus Untersuchungen mit Leichenkehlköpfen und digitalen Larynxmodellen (vgl. o. u. 1.2.1.1) überein. Isshiki und Ishizaka (1975, 1976; Isshiki, Tanabe, Ishizaka und Broad 1977a) simulierten in ihren Versuchen verschiedene Stellungen der Stimmlippen und Spannungsunterschiede zwischen ihnen. In Abhängigkeit von diesen Parametern ergaben sich drei Typen der Stimmlippenschwingung. Beim Typ II (s. Abb. 2.3.ab) ist die Glottis in der Phonationsstellung nicht geschlossen, aber es findet ein Kontakt zwischen den Stimmlippen statt, wenn sie vibrieren. Spannungsunterschiede rufen hier ein überaus kompliziertes Vibrationsmuster hervor. Die Schwingungen sind kaum noch periodisch. Zumindest in diesem Modell beeinflussen die Bewegungen der lädierten Stimmlippe auch die der gesunden, so daß beide irregulär vibrieren. Der Typ II ähnelt sehr dem Schwingungsverhalten, das bei einseitigen Stimmlippenlähmungen in Paramedianstellung beobachtet wird. Er wird perzipiert als rauh oder diplophon bzw. triplophon.

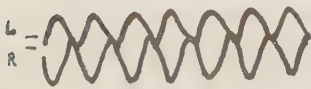


Abb. 2.3.aa

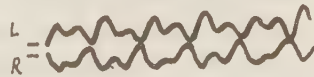


Abb. 2.3.ab



Abb. 2.3.ac

Abb. 2.3.a

Schwingungsmuster der Stimmlippen bei Spannungsunterschieden in Abhängigkeit von der Stimmlippenstellung bei der Phonation

(zu Abb. 2.3.a)

- a) Typ I: vollständiger Kontakt zwischen den Stimmlippen bei Phonationsstellung
- b) Typ II: geringer Abstand zwischen den Stimmlippen bei Phonationsstellung
- c) Typ III: großer Abstand zwischen den Stimmlippen bei Phonationsstellung (nach Isshiki, Ishizaka, Tanabe und Broad 1977)

Bei Intermediärstellungen kann das Schwingungsbild im Stroboskop auch normal erscheinen (Full-Scharrer 1974). Dies entspricht der in Abb. 2.3.ac als Typ III bezeichneten Schwingung. In diesem Fall sind die Stimmlippen so weit voneinander entfernt, daß während der Phonation kein Kontakt zwischen ihnen zustande kommt. Sie schwingen zwar leicht phasenverschoben, aber annähernd periodengleich. Die Periodizität der Schwingungen wird immer besser, je weiter die Stimmlippen voneinander entfernt sind. Allerdings ist die Amplitude der Vibrationen vergleichsweise klein. Eine mit dieser Art der Phonation produzierte Stimme wird als "breathy" beurteilt.

Natürlich können durch Modellversuche bisher nur elementare Charakteristika der Vibrationsmuster bei Stimmlippenlähmungen beschrieben werden. Dabei zeigt sich allerdings sehr deutlich die Abhängigkeit zwischen Schwingungsbild und Stellung bzw. Spannung und auch Masse der betroffenen Stimmlippe. Eine weitere Variable, in Abhängigkeit von der sich die Vibrationsmuster von ungleichmäßig gespannten Stimmlippen ändern, ist der subglottale Druck. Isshiki und Ishizaka erwähnen folgendes Beispiel: Beim als Typ I (Abb. 2.3.aa) bezeichneten Schwingungsbild ist die Glottis bei der Phonationsstellung ganz oder nahezu geschlossen. Trotz Spannungsunterschieden schwingen beide Stimmlippen periodisch, wenn auch leicht phasenverschoben. Diese Art der Phonation wird vom Hörer als nicht gestört empfunden. Eine Erhöhung des subglottalen Drucks führt jedoch in diesem Fall zu der als Typ II klassifizierten Phonation.

2.4 Einschränkung der Kontrolle über die Phonation

Bei Innervationsstörungen des Kehlkopfes ist die Fähigkeit, die Phonation zu kontrollieren, stark reduziert. Die maximale Phonationsdauer ist, gemessen an der vorhandenen Vitalkapazität, erheblich verkürzt

(Iwata und von Leden 1970b). Besonders bei Intermediärstellungen ist der Luftverbrauch während der Phonation sehr groß (Full-Scharrer 1974; Yoshioka, Sawashima, Hirose, Ushijama und Honda 1977).

Die Intensität der Stimme ist gering, weil dem Luftstrom kein genügend großer glottaler Widerstand entgegengesetzt werden kann. Schuttke und van den Berg (1976b) fanden dementsprechend erniedrigte Werte für den Effizienzparameter (s.u. 1.3.2) bei Patienten mit ein- und beidseitigen Stimmlippenlähmungen. Der Stimmumfang ist eingeschränkt (Murry 1978). Die Grundfrequenz wird auditiv häufig als erhöht beurteilt. Manchmal erscheint sie auch tiefer als vor der Erkrankung bzw. relativ zur normalen männlichen oder weiblichen Sprechstimmlage (Cornut und Pierucci 1968; Full-Scharrer 1974; Johannsen und Pascher 1976).

Die Regulation der Stimmhaftigkeit ist für Patienten mit einseitigen Stimmlippenlähmungen nur noch eingeschränkt oder gar nicht mehr möglich. Um die Charakteristika ihrer Stimmgebung zu beschreiben, findet sich in der Literatur eine Vielzahl von Termini, die bei aller Anschaulichkeit den Nachteil haben, nicht allgemeinverbindlich definiert zu sein. Von den über 50 Bezeichnungen für pathologische Stimmen, die Nessel (1960) anführt, seien als Beispiele "kratzend", "rauh", "tonlos", "hauchig" genannt, Luchsinger (Luchsinger und Arnold 1970: 372) erwähnt im Zusammenhang mit Stimmlippenlähmungen "belegte" und "kraftlose" Stimmen, die "heiser" sind und "Flattertöne" produzieren. Weitere Zusammenstellungen der umfangreichen Terminologie auf diesem Gebiet finden sich bei Pahn und Pahn (1975) und bei Klingholz (1978).

In der vorliegenden Arbeit sollen die Stimmen der Patienten mit Hilfe der in 1.3.4 erläuterten Phonationstypen beschrieben werden, die in der dort angegebenen Weise physiologisch und akustisch definiert sind. Natürlich ist zu beachten, daß bei der Phonation von Gesunden die Mechanismen bei der Produktion von Phonationstypen andere sind als die, die im strukturell modifizierten Larynx der Patienten ablaufen. Aber der auditive Eindruck und die akustischen Eigenschaften des Sprachsignals pathologischer Sprecher entsprechen denen von Phonationstypen so weitgehend, daß es gerechtfertigt erscheint, grundlegende Eigenschaften der Phonation der Patienten mit Hilfe der Phonationstypen zu beschreiben. Dies gilt

zumindest so lange, wie kein physiologisch-akustisches Deskriptionssystem pathologischen Sprechens vorliegt.

Einem gesunden Sprecher ist es möglich, zwischen den Phonationstypen zu wählen, ein Patient mit Stimmlippenlähmungen kann dies nicht mehr. Bei Intermediärstellungen findet sich, besonders wenn sie akut auftreten (Böhme 1974: 91, Luchsinger 1970: 366), das, was Aphonie genannt wird, d.h. der Luftstrom wird wie beim Flüstern nur in Turbulenzen verwandelt, nicht aber periodisch moduliert. Treten Vibrationen auf, streicht wie beim "breathy voicing" zusätzlich unmodulierte Luft in turbulenter Form durch die Glottis. Wenn die Intermediärstellung allmählich entstanden ist, findet unter Umständen aufgrund von Kompensationsbewegungen der gesunden Stimmlippe ein Kontakt zwischen den Stimmlippen statt, der aber unregelmäßig ist (Böhme 1974: 91). Es entsteht also ein dem "creaky voicing" vergleichbares Signal. Dieselbe Charakteristik trifft auf die Paramedianstellung zu, bei der aufgrund von Niveauunterschieden zusätzlich eine Rauschkomponente vorhanden sein kann, wie es beim "breathy voicing" der Fall ist (Isshiki, Yanagihara und Morimoto 1966).

Obwohl bei peripheren Stimmlippenlähmungen nur die Larynxfunktion betroffen ist, kann die Störung sich auf die anderen bei der Sprachproduktion beteiligten Funktionskreise auswirken. Johannsen und Pascher (1976) weisen auf Verspannungen der Lippen-, Kiefer- und Gaumenmuskulatur als unphysiologisch ablaufenden Kompensationsversuch hin. Außerdem wird häufig die Sprechatmung intensiviert, um den erhöhten Luftverbrauch auszugleichen. Dies führt zu einer Hochatmung mit deutlich hörbarem Inspirium.

2.5 Therapeutische Möglichkeiten und Prognose

Eine möglichst früh einsetzende logopädisch-phoniatrische Therapie ist für Patienten mit Stimmlippenlähmungen dringend indiziert (Cornut und Pierucci 1968; Böhme 1965, 1974: 91; Watt-Boolsen et al. 1977), und zwar ungeachtet der Ätiologie und für alle Fälle neurogener Stimmlippenlähmung (Gabriel und Chilla 1975).

Durch eine konservative Therapie wird eine Nervenregeneration, wenn sie möglich ist, beschleunigt. Außerdem wird der muskulären Atrophie sowie einer Ankylose des Cricoarytaenoid-Gelenkes vorgebeugt. Bei den

logopädischen Übungen wird der kompensatorische Glottisschluß trainiert, der für den Fall, daß die Lähmung bestehen bleibt, dem Patienten eine brauchbare Stimme wiederbringt (Full-Scharrer 1974; Hirose 1977). Bei dieser intralaryngealen Kompensation vollzieht die gesunde Stimmlippe eine Hyperadduktionsbewegung über die Medianlinie hinweg. Dabei bewegt sich der Aryknorpel der gesunden Seite meist vor, manchmal auch hinter dem auf der paretischen Seite her (Cornut und Pierucci 1968).

Die therapeutischen Möglichkeiten bestehen in Stimmübungsbehandlungen sowie elektrischen Reizungen. Auch medikamentöse Behandlungspläne werden vorgeschlagen (Poszgay et al 1967; Böhme 1974: 97; Johannsen und Pascher 1976).

Bei den Stimmübungsbehandlungen werden zunächst Summübungen auf Konsonanten und Vokalen in tiefer Bruststimme durchgeführt (Full-Scharrer 1974). Später schließen sich Stoßübungen nach Fröschels an (Fröschels 1932, 1935; Brodnitz 1966) oder die Atemwurfübungen nach Fernau-Horn (1954). Die Methode des subtonalen Brummtons nach Gutzmann (zit. nach Böhme 1974: 95) bewirkt eine temporäre Ausschaltung der Spanner und eine vermehrte Aktivität des Lateralis und der Interarytaenoid-Muskeln, wodurch ein Überschreiten der Medianlinie durch die gesunde Stimmlippe gefördert wird. Allerdings kann diese Übung Schwierigkeiten machen, weil sie den Patienten zum Husten reizt (Full-Scharrer 1974). Um unphysiologische Kompensationsbewegungen auszuschalten, ist außerdem die Kontrolle der Atmung und der Artikulation sehr wichtig (Brodnitz 1966; Full-Scharrer 1974).

Eine Elektrotherapie wird bei allen Stimmlippenlähmungen durchgeführt. Sie soll die Stimmübungsbehandlung unterstützen (Böhme 1965). Wenn sich bei Paramedianstellungen adduktorische Restbewegungen feststellen lassen (Full-Scharrer 1978: pers. Mitteilung) wird die Neurotonbehandlung als einzige Therapie angewandt (Full-Scharrer 1974; Kruse 1978).

Für die Neurotontherapie hat sich der Exponentialstrom als am besten erwiesen (Böhme 1965). Es handelt sich dabei um einen Dreiecksimpuls mit flacher Flanke, der selektiv nur die erkrankte Muskulatur erfaßt. Er soll sie stützen und auf diese Weise Niveaudifferenzen zwischen den Stimmlippen verhindern oder aufheben und dem Aryknorpelvorfall vorbeugen.

Diese Therapie muß mehrmals pro Woche und über einen langen Zeitraum durchgeführt werden.

Die Prognose bei einseitigen Stimmlippenlähmungen ist im allgemeinen günstig. Bei reversiblen Lähmungen tritt eine völlige Wiederherstellung der Stimmfunktion ein (Cornut und Pierucci 1968), bei der auch eine Muskelatrophie nach und nach behoben wird (Hiroto 1976). Bei irreversiblen Lähmungen ist die Stimme nach Erreichen der intralaryngealen Kompensation wieder gebrauchsfähig für den Alltag, häufig bleiben aber Modulationsfähigkeit und Intensität reduziert (Cornut und Pierucci 1968). Die Singstimme oder eine für einen Sprecherberuf ausreichende Stimme kann durch die intralaryngeale Kompensation in der Regel nicht wieder hergestellt werden (Full-Scharrer 1974).

Wenn keine Nervenregeneration erfolgt und auch keine intralaryngeale Kompensation hergestellt werden kann, bleiben operative Eingriffe die letzte Möglichkeit, die allerdings erst nach längerer Zeit (12 Monate nach Böhme 1974: 97; 2 Jahre nach Gabriel und Chilla 1975) indiziert ist. Das Ziel dieser Eingriffe besteht in der Heranführung des Stimmbandes an die Medianlinie. Dabei können Knorpeltransplantate eingesetzt werden (Denneke 1964), in letzter Zeit wird allerdings der Injektion von Kunststoffen, z.B. Teflon, der Vorzug gegeben (Arnold 1963; Rontal et al. 1976; Kitzing und Loequist 1977; Nassar 1977. Die Wiederherstellung eines suffizienten Glottisschlusses ist nicht nur für die Stimmverbesserung notwendig. Der Larynx muß auch seine vitalen Funktionen wieder übernehmen können, die bei einer stets offenen Glottis gestört sind: das Husten und damit die Lungenhygiene ist behindert und das Aspirationsrisiko ist erhöht (Rontal et al. 1976).

2.6 Akustische Untersuchungen zur pathologischen Phonation

2.6.1 Pathologisches Sprachsignal und akustische Verfahren

Wie aus den Darstellungen unter 2.3 hervorgeht, gibt es bei der durch einseitige Stimmlippenlähmung gestörten Larynxfunktion zwei wesentliche Charakteristika der Phonation: Die Stimmlippen schwingen unregelmäßig und der Glottisschluß ist unvollständig. Dadurch wird die Grundschiwingung

aperiodisch und die harmonische Energie im Spektrum wird reduziert. Außerdem entstehen Geräuschanteile, die auf den insuffizienten Glottisschluß, auf Niveaudifferenzen und auch auf unregelmäßige Stimmlippenvibrationen zurückzuführen sind (Flanagan 1958; Isshiki et al. 1966). Zur Darstellung bzw. Messung dieser Eigenschaften der Phonation sind verschiedene akustische Verfahren beschrieben. Dabei liegen nicht in jedem Fall Untersuchungsergebnisse zu Stimmlippenlähmungen vor, die im folgenden angeführten Methoden sind jedoch auf diese Störung anwendbar, weil sie Änderungen des Vibrationsmusters der Stimmlippen bzw. des Signalspektrums erfassen.

Bei den akustischen Methoden unterscheidet man grundsätzlich Verfahren im Zeitbereich und Verfahren im Frequenzbereich. Dabei wird in den meisten Fällen direkt das von Mund und Nase abgestrahlte Signal untersucht. Um Einflüsse des Ansatzrohrs auszuschließen, wurde bei einigen Untersuchungen mit einem Halsmikrophon gearbeitet (z.B. Koike 1969). Um denselben Effekt zu erzielen, wurden in der letzten Zeit verschiedene Methoden des Inversen Filterns zur Analyse pathologisch veränderter Stimmen eingesetzt (Hiki et al. 1975; Koike und Markel 1975; Davis 1975, 1976, 1978; Ono, Saito, Fukuda und Tamura 1976).

2 Verfahren im Zeitbereich

Im Zeitbereich werden Variationen im Vibrationsverhalten der Stimmlippen untersucht. Aus perzeptiven Studien geht hervor, daß Unregelmäßigkeiten der Stimmlippenschwingung eine große Rolle spielen, wenn eine Stimme als gestört beurteilt wird (Bowler 1964; Wendahl 1963, 1966, 1966b). Unregelmäßig sind dabei aufeinander folgende Grundperioden sowohl in ihrer Dauer ("jitter") als auch in ihrer Amplitude ("shimmer") (Wendahl 1966b). Variationen aufeinanderfolgender Grundperioden hinsichtlich ihrer Dauer werden auch mit "pitch perturbations" bezeichnet (Lieberman 1961, 1963). Sie sind ein wichtiges diagnostisches Kriterium zur Beurteilung der operationalen Effizienz des neuromuskulären Kontrollsystems bei der Phonation (Schoultz-Coulon 1975, 1978).

"Pitch perturbations" als Abweichungen aufeinanderfolgenden Grundperioden ergeben sich aus

$$t = T_n - T_{n-1},$$

wobei: t = Differenz,

T_n = augenblicklich gemessene Periode,

T_{n-1} = vorher gemessene Periode.

Bei ihrer Beurteilung muß die Tatsache in Betracht gezogen werden, daß auch bei gesunden Sprechern aufeinanderfolgende Grundperioden niemals vollständig identisch sind. Diese Eigenschaften trifft allenfalls auf die Sprache von Automaten zu (Fant 1970: 17).

Daher ergab sich auch bei der Untersuchung von Iwata und von Leden (1970a) bei der Berechnung von "pitch perturbations" für gesunde Sprecher eine fast symmetrische, glockenförmige Verteilung mit einer Range von -0.6 bis +0.5 msec. Bei pathologischen Stimmen war die Range größer: Für einseitige Stimmlippenlähmungen reichte sie von -0.9 bis +1.0 msec. Die Werte zwischen einzelnen Krankheitsgruppen unterschieden sich allerdings kaum, bis auf die für maligne Tumoren, bei denen die Größe der "pitch perturbations" zwischen -8.6 und +9.0 msec lag.

Zur Messung von "pitch perturbations" führte Lieberman (1961, 1963; Smith und Lieberman 1969) den "pitch perturbation factor" ein. Weil Abweichungen aufeinanderfolgender Grundperioden von ± 0.5 msec noch als normal angesehen werden, wird der Faktor definiert als Prozentsatz der Abweichungen Δt , die größer als 0.5 msec sind. Der "pitch perturbation factor" wächst mit zunehmender Schwere der Krankheit.

In der Folge wurden noch einige weitere Verfahren zur Berechnung von "pitch perturbations" vorgeschlagen. Hecker und Kreul (1970), die bei der Wiederholung von Lieberman's Versuchen seine Ergebnisse nicht bestätigen konnten, definierten einen neuen "directional pitch perturbation factor", bei dem die Häufigkeit der Vorzeichenänderungen bei den Abweichungen aufeinanderfolgender Grundperioden in Prozent ausgedrückt ist. Ein weiteres Maß für "pitch perturbations" stammt von Koike (1973). Dabei werden die Variationen von einer geglätteten Trendlinie aus gemessen und zusätzlich wird durch die durchschnittliche Grundperiodenlänge dividiert, um eine Normierung durchzuführen. Das Maß für die "relative average perturbation" ergibt sich aus der Formel

$$RAP = \frac{\frac{1}{N-2} \sum_{i=2}^{N-1} \left| \frac{P(i-1)+P(i)+P(i+1)}{3} - P(i) \right|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P(i)}$$

Dabei bezeichnen die $P(i)$, $i=1,2,\dots,N$ die aufeinanderfolgenden Grundperioden. Im Zähler steht die Berechnung der durchschnittlichen "pitch perturbation" und die Glättung durch ein Drei-Punkte Fenster, im Nenner die durchschnittliche Grundperiodenlänge. Durch den RAP-Faktor konnten normale von pathologischen Fällen unterschieden werden. Außerdem konnten verschiedene Werte für Patienten mit Neoplasmen und mit einseitigen Stimm lippenlähmungen berechnet werden.

Neben den Variationen in der Dauer werden auch die Unterschiede in den Amplituden der Grundperioden gemessen (Koike 1969; von Leden und Koike 1970). Dabei werden mit Hilfe von Autokorrelationstechniken seriale Korrelationskoeffizienten bestimmt. Für gesunde Sprecher ergab sich eine quasiperiodische Amplitudenmodulation mit einer Periodendauer von 10 bis 15 Grundperioden, von der angenommen wird, daß sie dem Vibrato der Stimme entspricht. Bei Sprechern mit Larynxtumoren zeigte sich eine erheblich verkürzte Dauer der Langzeitperiode bei der Amplitudenmodulation, und bei Sprechern mit einseitigen Stimmlippenlähmungen fehlte die Amplitudenmodulation.

Zwei weitere Meßwerte zur Bestimmung von Variationen der Grundfrequenz wurden von Takhashi und Koike (1975) entwickelt. Der "frequency perturbation quotient" (FPQ) ist analog zum RAP definiert, aber für den Wert der Grundperiode wird deren reziproker Wert, die Grundfrequenz eingesetzt. Der "amplitude perturbation quotient" (APQ) ist ebenfalls analog zum RAP definiert, aber in diesem Fall werden Amplitudenwerte für jede Grundperiode eingesetzt.

Die restlichen noch zu besprechenden Verfahren im Zeitbereich basieren auf verschiedenen Methoden des Inversen Filterns. Dabei werden entweder - auf eine nicht näher bezeichnete Weise - die Formanten des vom Patienten artikulierten Vokals geschätzt und von Hand entfernt (Hiki, Imaizumi, Hirano, Matsushita und Kaikita 1976; Ono, Saito, Fuhuda und Tamura 1976), oder die Lippenradiation, die Modifikation durch das Ansatzrohr und das Spektrum des Glottisschalls werden automatisch kalkuliert (Koike und Markel 1975; Davis 1976b). Bei der ersten Methode resultiert ein Zeitsignal, dessen Form der der Volumengeschwindigkeitsfunktion ähnlich ist, bei der zweiten ergibt sich das "Residuum-Signal", das bei gesunden Stimmen scharfe Maxima aufweist, wobei die Abstände zwischen den Maxima der Dauer der Grundperiode entsprechen. Bei pathologischen Stimmen hat ein insuffizienter Glottisschluß eine Anhebung der Geräuschkomponenten

zwischen den Maxima zur Folge (siehe Abb. 2.b.a). An dem durch Inverses Filtern gewonnenen Signal können "pitch perturbations" und Amplitudenvariationen bestimmt werden (Hiki et al. 1976; Davis 1976b).

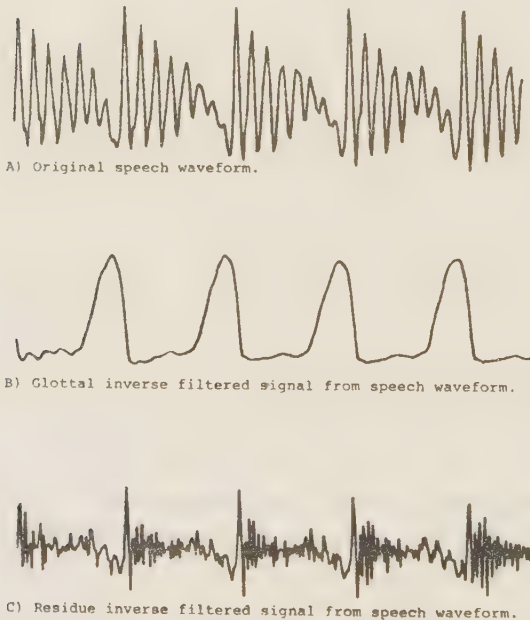


Abb. 2.6.aa) Original Sprachsignal, b) und c) Signale nach
inversen Filtern (aus Davis 1976b)

Eine weitere Möglichkeit, die Periodizität des Signals zu bestimmen, besteht in der Berechnung der Autokorrelationsfunktion über das Signal. Aus den Amplituden der peaks der Autokorrelationsfunktion ergibt sich dabei ein Maß für die Periodizität der Schwingung. Nach Ono et al. (1976) ergab sich für eine gesunde Sprechergruppe in 99 % der Fälle ein Wert von 1 für die Amplituden der Autokorrelationspeaks, und bei der pathologischen Sprechergruppe schwankten die Werte zwischen 0.83 und 0.99. Bei einer Patientin mit Stimm lippenlähmung ließ sich kein Korrelationskoeffizient bestimmen. Auch eine Kreuzkorrelation der Signale mit einem nicht-pathologischen Referenzsignal ergab für die gesunde Gruppe im Mittel höhere Werte als für die kranke. Allerdings wurden die Kriterien für die Auswahl des Referenzsignals nicht näher benannt.

Der Parameter "pitch Amplitude" (PA) von Davis (1976b) wird in einer dem Verfahren von Ono et al. vergleichbaren Weise gewonnen: Nach der Berechnung der Autokorrelationsfunktion des Residuum-Signals ergeben die Amplituden der Autokorrelations-Maxima ein Maß für die Stimmhaftigkeit des Sprachsignals. Der Parameter PA hat für normale Sprecher einen Mittelwert von 0.725 und für pathologische Sprecher von 0.599. Der Unterschied ist signifikant auf dem 95 %-Niveau. Die absoluten Werte, die sich aus der Autokorrelationsmethode bei Davis und Ono et al. ergaben, sind allerdings nicht miteinander vergleichbar, weil sie auf unterschiedliche Methoden des Inversen Filterns beruhen.

Ein weiteres Verfahren im Zeitbereich ist die Berechnung des Parameters EX (Davis 1976). Er ist ein Maß für den Geräuschanteil im Signal oder für den "Signal-Rausch-Abstand" (Koike und Markel 1975) im Signal, wenn die peaks des "Residuum-Signals" als "Rauschen" aufgefaßt werden. Bei stimmhaften Signalen ist die Amplitude der peaks relativ zum Rauschen hoch. Bei pathologischer Phonation ist die Energie der Geräuschanteile oft so groß, daß die peaks nicht mehr erkennbar sind. Quantifizierbar werden diese Eigenschaften des Signals, wenn die Verteilung der Amplitudenwerte berechnet wird: Bei gesunden Sprechern ist sie höher und schmaler als bei kranken Sprechern. Aus der Berechnung des Exzess-Koeffizienten - ein statistisches Maß, das den Grad der Abweichung einer Verteilung von

der Gauss'schen Normalverteilung bestimmt - ergibt sich danach der Parameter EX.

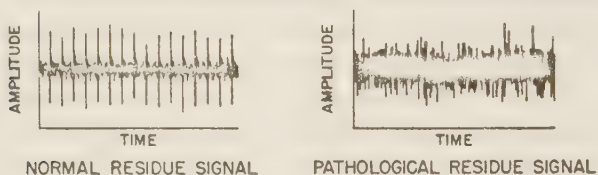


Abb. 2.6b Vergleich zwischen normalem und pathologischem Signal nach inversem Filtern (nach Davis 1976b)

2.6.3 Verfahren im Frequenzbereich

Um pathologische Stimmen im Frequenzbereich zu beurteilen, werden Spektrogramme hergestellt, bei denen in der Regel das Signal mit einer Filterbank oder einem sich bewegenden Bandpass-Filter abgetastet und die Verteilung der spektralen Energie in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt wird. In vielen Untersuchungen wird dabei der "Sonograph" eingesetzt, bei dem die Zeit als dritte Dimension hinzukommt und Variationen der spektralen Energie durch unterschiedliche Schwärzungsgrade wiedergegeben werden (Potter, Kopp und Greene 1960). Die Möglichkeiten, den "Sonographen" in der phoniatischen Diagnostik einzusetzen, werden betont, weil er pathologische Veränderungen der Stimme sichtbar macht (Rontal und Tontal 1975; Hirano und Matsushita 1978). Er macht sie allerdings nicht meßbar. Die Kennzeichnung von Spektren durch Meßwerte ermöglichen dagegen die spektralanalytischen Verfahren der digitalen Signalverarbeitung (Rothauser und Maiwald 1969)

In spektrographischen Darstellungen zeigen sich Unregelmäßigkeiten der Grundschwingung (Gerull, Giesen, Hippel Mrowinski und Schweers 1977). Auf "Sonagrammen" werden Grundfrequenzvariationen in Abhängigkeit von der Auflösung sichtbar: Im "broad-band"-Verfahren durch unterschiedlich große Abstände zwischen den senkrechten Linien, die den Periodengrenzen entsprechen, und dies besonders gut bei Dehnung in der Zeit (Cornut 1971).

Im "narrow-band" Verfahren sind dementsprechend Verzerrungen, unregelmäßige Verläufe und Einbrüche in den harmonischen Strukturen erkennbar (Rontal und Rontal 1975). Häufig zeigt sich im Fall von Stimmlippenlähmungen eine auf Diplophonie zurückzuführende zweite harmonische Reihe (Nessel 1961; Schönhärl 1963; Frank 1971; Cornut und Pierucci 1968).

Ein wichtiger Anhaltspunkt zur Kennzeichnung pathologischer Stimmen ist die Verteilung von harmonischer Energie und Rauschen im Spektrum (Yanagihara 1967; Wendler, Wagner, Seidner und Sturzenbecher 1976). Nach Franks Untersuchung (Frank 1971) an Patienten mit Stimmlippenlähmungen ist oberhalb von 2800 Hz keine harmonische Energie mehr vorhanden. Nach Nessel (1961) findet sich bei gesunden Stimmen oberhalb von 5000 Hz keine harmonische Energie mehr. Bei pathologischen Stimmen sind dagegen in diesem Bereich mehr oder weniger starke Geräuschanteile vorhanden, die in Abhängigkeit von der Schwere der Erkrankung auch die harmonischen Strukturen unterhalb der 5000 Hz-Grenze leicht bis stark überlagern. Drei Spektrogramme von einem Patienten mit einseitiger Stimmlippenlähmung in Intermediärstellung zeigen nach Nessel folgenden Verlauf: Vor der Stimmtherapie stellt sich im Spektrum ein formantmoduliertes breitbandiges Rauschen dar, während der Therapie kehrt die harmonische Oberwellenstruktur zurück, und nach Abschluß der Therapie waren die Geräuschanteile zwischen 6 und 11 kHz verschwunden.

Yanagihara (Isshiki, Yanagihara und Morimoto 1966; Yanagihara 1967) machte "Sonagramme" von Vokalen im "narrow-band"-Verfahren und erstellte anhand des Ausmasses, in dem die harmonische Komponente durch Geräuschanteile überlagert bzw. ersetzt sind eine vierstufige Skala, nach der pathologische Stimmen hinsichtlich des Grads an Heiserkeit unterschieden werden können. Iwata und von Leden (1973c) wandten Yanagiharas Skala auf Contour-Display "Sonagramme" an. Aufnahmen des Vokals [a] von Patienten mit verschiedenen schweren Stimmstörungen zeigen eine Zunahme an Irregularitäten in der spektralen Energieverteilung, die besonders gut in der Darstellung des ersten Formanten sichtbar wird. Auf logarithmisch skalierten Contour-Display-"Sonagrammen" berechnet Padovani (1974) den gemeinsamen Schwerpunkt der drei dunkelsten Flächen (GEM) beim von dem

Patienten produzierten [i]. Nach einer Stimmtherapie, die einen insuffizienten Glottisschluß beseitigt und eine Energiezunahme der harmonischen Komponenten zur Folge hat, zeigt der GEM eine "Wandertendenz" in obere Frequenzbereiche. Bei Stimmlippenlähmungen beträgt nach erfolgreicher Therapie die Verschiebung etwa 1 cm (Padovani 1977: pers. Mitteilung).

Eine weitere Möglichkeit, die Reduktion von harmonischer Energie bzw. die Maskierung von Formanten durch Rauschen zu messen, besteht nach Davis (1976b) darin, die Flachheit des Spektrums von "Residuum-Signal" bzw. vom inversen Filter zu untersuchen. Mit Hilfe der entsprechenden Messungen konnten allerdings pathologische von gesunden Stimmen nur auf einem Signifikanzniveau von 90 % unterschieden werden, und die Werte zeigten während einer erfolgreichen Stimmtherapie, ebenso wie der Parameter PA (s.o.u.2.6.2) keine Veränderung (Davis 1978).

Während bei den bisher erwähnten Untersuchungen das Spektrum über ein relativ kurzes Segment, in der Regel isolierte Vokale, analysiert wurde, wird bei spektralen Langzeitanalysen ein gemitteltes Spektrum über die stimmhaften Anteile eines Textes von ungefähr 45 sec Dauer bestimmt (Frokjaer-Jensen und Prytz 1974, 1976). Die Besonderheit spektraler Langzeitanalysen liegt darin, daß bei genügend großer Länge des Textes - nach Frokjaer-Jensen und Prytz (1974) reichen bereits 20 sec. aus - die wechselnden Resonanzcharakteristika des Ansatzrohres weggemittelt werden. Die gemittelten Spektren zeigen die Verteilung der harmonischen Energie im Frequenzbereich, die bei normalen Sprechern Maxima unterhalb 500 Hz aufweist und dann abfällt. Mit LTAS lassen sich Veränderungen der Energieverteilung im Spektrum im Verlauf einer Stimmtherapie gut erfassen. Das betrifft die Anteile an harmonischer Energie ebenso wie Geräuschanteile, die nach Yanagihara (1967) konstante Bandbereiche haben und deren Bandbreite mit zunehmendem Schweregrad der Stimmstörung wächst.

Die spektralen Langzeitanalysen ("long time-average-spectra", LTAS), die von Patienten mit Stimmlippenlähmung vor und nach der Therapie gemacht wurden, zeigen die folgenden Veränderungen: Bei der ersten Gruppe ist die spektrale Energie in den oberen Frequenzbereichen erhöht, wobei

vor allem ein Energiemaximum zwischen 3.5 und 4.5 kHz auffällt. Frokjaer-Jensen und Prytz führen diese Erscheinung auf eine phonatorische Hyperfunktion zurück. Eine Stimmtherapie hat in diesem Fall eine Reduktion der spektralen Energie zur Folge. Bei der zweiten Gruppe liegt eine phonatorische Hypofunktion vor und eine Therapie führt zur Verstärkung der Energie in den oberen spektralen Bereichen.

Quantifizierbar werden diese Ergebnisse durch den Faktor α . Ausgehend von der Beobachtung, daß sich bei Stimmlippenlähmungen die Veränderungen im Spektrum hauptsächlich im Bereich oberhalb 1000 Hz bemerkbar machen, wird definiert als das Verhältnis zwischen der Energie oberhalb 1000 Hz und der Energie unterhalb 1000 Hz. Der α -Parameter wird von einem Digitalrechner 25 mal pro Sekunde bestimmt und seine Werte werden in Form eines Histogramms wiedergegeben. Bei einer Patientin mit Stimmlippenlähmung, bei der nach der Therapie die spektrale Energie in oberen Frequenzbereichen angestiegen war, erhöhte sich der mittlere Wert von um ungefähr 4 dB.

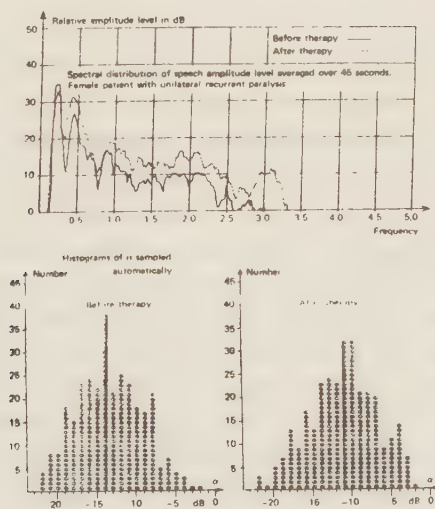


Abb. 2.6.c LTAS und Faktor α vor und nach der Stimmtherapie (nach Frokjaer-Jensen und Prytz 1976)

Wie Wedin, Leanderson und Wedin (1978) gezeigt haben, äußert sich der Effekt eines Stimmtrainings bei Sängern ebenfalls in der Erhöhung des Faktors α .

2. Zusammenfassung

Im zweiten Kapitel wurde beschrieben, welche strukturellen Modifikationen im Larynx bei einseitigen Stimmlippenlähmungen auftreten, wie sich dadurch das Phonationsgeschehen verändert und welche therapeutischen Möglichkeiten bei dieser Erkrankung zur Verfügung stehen. Daran anschließend wurden die akustischen Verfahren geschildert, die bisher angewendet wurden, um die durch pathologische Veränderungen gestörte Phonation zu beschreiben bzw. zu messen.

Im nächsten Kapitel soll nun die eigene Untersuchung dargestellt werden, deren Ziel darin besteht, Veränderungen der Phonation im Verlauf einer Stimmtherapie mit Hilfe von akustischen Verfahren zu erfassen.

3. Eigene Untersuchung zur Pathologischen Phonation

3.1 Ziel der Untersuchung

Das Fernziel von Untersuchungen wie dieser besteht darin, ein diagnostisches Instrumentarium zu erstellen, das auf akustischen Verfahren beruht und mit dessen Hilfe Funktionsbeeinträchtigungen der Stimme anhand von Meßwerten beurteilt werden können. Auf dem Weg zu diesem Ziel ist bisher allenfalls eine kleine Strecke zurückgelegt worden. Durch den Beitrag dieser Arbeit soll ein weiterer Schritt auf das zu erreichende Ziel hin getan werden, indem verfolgt wird, wie sich akustische Parameter, die sich zur Stimmbewertung eignen, im Verlauf einer Stimmtherapie entwickeln. Anhand der Ergebnisse der Untersuchung soll sich eine Antwort auf die Frage ergeben, ob es möglich ist, den Erfolg einer Stimmtherapie durch akustische Parameter darzustellen und welche Parameter zu diesem Zweck eine besondere Eignung versprechen.

Um die Entwicklung der akustischen Parameter bei den einzelnen Patienten vergleichbar zu machen, ist es sinnvoll, sich bei der Analyse auf ein bestimmtes Symptom der Stimmerkrankung zu beschränken. Die bei dieser Arbeit untersuchten Patienten hatten alle die in Kapitel 2 näher beschriebene Stimmlippenlähmung und unterzogen sich der entsprechenden Therapie.

3.2 Sammlung des Materials

In dem Zeitraum zwischen Sommer 1977 und Winter 1978 wurden eine Reihe von Patienten, die eine einseitige Stimmlippenlähmung hatten, auf Tonband aufgenommen¹³. Die Stimmen von insgesamt sechs Patienten konnten schließlich zu Beginn, während und am Ende der Stimmtherapie festgehalten werden. Ausfälle erklären sich dadurch, daß die Therapie abgebrochen wurde oder erfolglos blieb. In einigen Fällen trat der Therapieerfolg auch sehr schnell ein, was für den Patienten günstig, für diese Untersuchung aber ungünstig war, weil es nicht als sinnvoll erscheint, für die Beurteilung

eines Verlaufs weniger als drei Zustände im Fortgang der Therapie festzuhalten. Patienten, von denen nur zwei Aufnahmen gemacht werden konnten, wurden daher von der Analyse ausgeschlossen.

Der Zusammenstellung des Materials, das die Patienten während jeder Aufnahmesitzung produzieren sollten, lag die Überlegung zugrunde, daß die natürlichen Bedingungen der Phonation, die sich bei akustischen Langzeitanalysen in Meßwerten äußern, so gut wie möglich erfaßt werden sollten. Bei Langzeitanalysen gibt es die Möglichkeit, die Patienten einen Text lesen zu lassen (Lieberman 1963; Froekjaer-Jensen und Prytz 1974, 1976). In dieser Untersuchung ergaben sich dabei technische Schwierigkeiten - einige Patienten waren alterssichtig und führten ihre Lesebrille nicht immer bei sich, in den Räumlichkeiten bestand keine Möglichkeit, das Blatt mit dem Text für den Patienten lesbar zu installieren, so daß er es halten mußte, was zu unerwünschtem Papierrascheln führte -, so daß die Patienten stattdessen eine Liste von "items" bei jeder Sitzung produzierten. Sie enthält CV-Silben, isolierte Vokale, Wörter und Syntagmen. Die Zeit für die Produktion der "items" beträgt ungefähr 30 sec.; diese Dauer genügt nach Froekjaer-Jensen und Prytz (1974) für die Berechnung von spektralen Durchschnittswerten. Die "items" wurden den Patienten vorgesprochen, und es wurde die Anweisung gegeben, sie in normaler Sprechstimmlage zu wiederholen.

Liste der "items", die von den Patienten bei jeder Sitzung produziert wurden:

pa, de, bi, to, u, o, a, e, i, na (mit steigender Grundfrequenz),
na (mit fallender Grundfrequenz), m m, aua, au, ai, geöffnete Öfen,
Eile mit Weile, Limonade, Vereidigung, beurlauben, hintanstellen,
Schokoladenpudding, aus, Haus, Maus, eben, heben, apart, Abart.

Die Aufnahmen wurden in den meisten Fällen in den akustisch präparierten Räumen der Hals-Nasen-Ohren-Klinik der Universität München gemacht. Bei zwei Patienten, die nicht aus dem Krankengut dieser Klinik stammten und auch nicht dorthin oder in die Aufnahmeräume des Instituts für Phonetik bestellt werden konnten, wurde auf eine sehr ruhige Umgebung für die Aufnahme Wert gelegt. Aufnahmegerät war ein Tonbandgerät Nagra I V L mit einem Sennheiser Mikrophon (Md 421).

3.3 Auswertung

3.3.1 Erhobene Daten

Gemäß dem Ziel der Untersuchung wurden in den Digitalrechner des Instituts für Phonetik (PDP 11/50) die unter 3.3.2 näher spezifizierten akustischen Verfahren implementiert, mit denen die Stimmen der Patienten analysiert wurden. Um eine Kontrolle über die über die Entwicklung der Parameter im Verlauf der Therapie zu haben, wurde das gesamte Material von einer Gruppe von Transkribenden des Instituts auditiv beurteilt. Eine weitere Kontrolle über den Therapieverlauf war durch die Befunde gegeben, die aus den Krankenblättern übernommen werden konnten (vgl. 3.4.1 und 3.4.2). Die Kriterien der auditiven Beurteilung sind unter 3.3.3 näher erläutert.

3.3.2 Akustische Analyse

3.3.2.1 Vorüberlegungen

Die Wahl der Verfahren, mit deren Hilfe die Stimmen der Patienten akustisch analysiert wurden, wurde nach den folgenden Gesichtspunkten getroffen:

Erstens: Die Parameter mußten die Besonderheiten der Phonation von Patienten mit einseitigen Stimmlippenlähmungen erfassen, d.h. die Daten sollten auf Irregularitäten der Grundfrequenz und Eigenschaften der Verteilung von harmonischer Energie und Geräuschanteilen im Spektrum hin untersucht werden.

Zweitens: Die Auswertung sollte automatisch laufen, um zu gewährleisten, daß, während die Bedingungen der Phonation bei den Patienten sich ändern, die Bedingungen zur Berechnung der Meßwerte immer gleich bleiben.

Zu den Ergebnissen, die die Analyse erbringen soll, kann folgendes gesagt werden: Es handelt sich in dieser Untersuchung insofern um eine Fallstudie, als an einer kleinen Gruppe von Patienten die Entwicklung akustischer Parameter während der Stimmtherapie detailliert verfolgt werden soll. Dabei können noch keine Normwerte angenommen werden, auf die sich die Werte der Parameter hin entwickeln. Allerdings können Vorannahmen gemacht werden über die Richtung, in der sich die Meßwerte bei besserer Stimmfunktion verändern sollten. Diese zu erwartenden Tendenzen werden bei der Erläuterung der einzelnen Parameter in 3.3.2.3 und 3.3.2.4 angeführt.

3.3.2.2 Arbeitsweise der Verfahren

Den Vorüberlegungen entsprechend wurde ein System von Computer-Programmen zur akustischen Analyse so konzipiert, daß nach Eingabe in den Rechner die gesamte Auswertung vollautomatisch lief. Eine ausführliche Darstellung der Arbeitsweise der Verfahren findet sich bei Simon (1979). Dabei wird als erster Schritt eine Grundfrequenzanalyse nach dem Verfahren von Rabiner (1977) durch geführt. Dessen Besonderheit liegt darin, daß vor der Berechnung der Autokorrelationsfunktion über den Sprachschall die Daten nicht-linear verzerrt werden. Bei den von Simon (1979) entwickelten Programmen wurde hierfür Rabiner's dritte Variante, die Kombination von "center" und "peak clipping" verwendet. Mit Hilfe dieses Verfahrens werden zunächst stimmhafte und stimmlose Anteile des Sprachschalls unterschieden und es werden die Periodengrenzen markiert. Alle weiteren Berechnungen werden an den als stimmhaft erkannten Segmenten vorgenommen.

Die Verfahren arbeiten im Zeitbereich und im Frequenzbereich. Bei den meisten wird dabei das direkt abgestrahlte Signal analysiert, ein Verfahren untersucht die LPC-Error Funktion und entspricht damit der von Koike und Markel (1975) vorgeschlagenen und von Davis (1976b) angewandten Methode (Rabiner und Schafer 1978: 397).

3.3.2.3 Akustische Parameter im Zeitbereich

Das Zeitsignal wird mit Hilfe der folgenden Verfahren auf Geräuschteile und Unregelmäßigkeiten der Grundfrequenz hin untersucht, woraus sich die mit Großbuchstaben bezeichneten Parameter ergeben:

1.) RMN - Verhältnis zwischen relativen Maxima und Nulldurchgängen. Dies ist ein Maß für die Verrauschtheit eines Signals. Rauschfrequenzen, die z.B. bei stimmhaften Frikativen erzeugt werden, die aber auch auftreten, wenn der Luftstrom bei der stimmhaften Phonation infolge eines inkompletten Glottisschlusses nur teilweise moduliert wird, stellen sich im Signal durch eine hochfrequente statistische Zappelschwingung dar. Diese liefert eine große Zahl relativer Maxima. Die Zahl der Nulldurchgänge wird durch die harmonische Grundschiwingung bestimmt und durch die Rauschschwingung wenig beeinflusst. Die Division der Zahl der relativen Maxima durch die Zahl der Nulldurchgänge, ist eine Normierung, aus der sich der Parameter RMN ergibt. Bei sich bessernder Stimmfunktion, d.h. abnehmenden Geräuschteilen, sollte der RMN kleiner werden. M.W. ist ein vergleichbares Ver-

fahren in der Literatur noch nicht beschrieben.

2.) ASS - Anteil stimmhaften Sprachschalls in Prozent. Der ASS ergibt sich aus der Relation "stimmhafter Sprachschall / stimmhafter + stimmloser Sprachschall". Bei dem oben angeführten Autokorrelationsverfahren wird ein Sprachsignal dann als stimmhaft erkannt, wenn das zweite Maximum der Autokorrelationsfunktion einen Wert von 0.25 oder mehr hat. Als stimmlos bewertet wird ein Segment des Signals, wenn entweder keine periodische Schwingung vorhanden ist, wie beim Flüstern, oder auch wenn aufeinanderfolgende Grundperioden extrem unregelmäßig, d.h. unähnlich sind. Es wird erwartet, daß bei therapeutischen Fortschritten der Anteil des als stimmhaft erkannten Sprachschalls wächst. Untersuchungen mit einem vergleichbaren Verfahren liegen m.W. noch nicht vor.

3.) MGF - mittlere Grundfrequenz. Über die Entwicklung der mittleren Grundfrequenz können keine Vorannahmen gemacht werden, weil sie inter-individuellen Variationen unterliegt (Cornut und Pierucci 1968).

4.) AP - Amplitudenvariationen (Takahashi und Koike 1975; Davis 1976b). Durch den AP wird die gemittelte Differenz zwischen den Amplitudenmitteln benachbarter Perioden bestimmt. Das Verfahren, mit dem dabei entschieden wird, ob zwei Perioden als benachbart zu betrachten sind, ist adaptiv: Die Zeit zwischen zwei als stimmhaft erkannten Grundperioden darf nicht länger als die doppelte Länge der zuletzt bestimmten Grundperiode sein. Der Betrag der Amplitudendifferenz wird dabei in willkürlichen Einheiten festgehalten, denen der Mechanismus der Digitalisierung bei der Eingabe der Daten in den Rechner zugrunde liegt; Die der Amplitude des Signals entsprechenden Spannungszustände in Volt werden im Rechner in Zahlen zwischen 0 und 4096 verwandelt. Die Amplitudenvariationen werden mit diesen Werten berechnet. Mit zunehmender Regelmäßigkeit der Stimmlippenschwingung sollte der AP abnehmen.

5.) PP - Grundfrequenzvariationen (vgl. Lieberman 1961, 1963; Hecker und Kreull 1969; Iwata und von Leden 1970a; Koike 1973; Davis 1976b). Der PP ist definiert als die mittlere Differenz der Länge aufeinanderfolgender Grundperioden. Das Kriterium der Aufeinanderfolge von Grundperioden ergibt sich aus demselben adaptiven Verfahren wie beim AP. Die Angabe erfolgt in Hz. Der PP sollte bei zunehmender Regelmäßigkeit der Stimmlippenschwingung abnehmen.

6.) KK - Korrelationskoeffizient. (vgl. Ono et al 1976; Davis 1976b). Der KK ergibt sich aus dem gemittelten Wert der Maxima der Autokorrelationsfunktion. Je ähnlicher aufeinanderfolgende Grundperioden einander sind, umso höher ist die Amplitude der Autokorrelationsmaxima. Der KK ist somit ein Wert für die Periodizität der Stimmlippenschwingung. Es wird erwartet, daß er bei erfolgreicher Stimmtherapie ansteigt.

7.) LES - Integral über das "Error-Signal", das der linearen Prädiktion resultiert. Bei der Bestimmung des Parameters LES werden die Beträge der "Error-Funktion" aufsummiert. Bei gesunden Stimmen und stimmhafter Phonation hat das "Error-Signal" in Abständen der Grundperiodenlänge scharfe Maxima, dazwischen schwankt es um Null. Wenn zur Grundschwingung Geräuschkomponenten kommen, nimmt das Signal zwischen den Maxima zufällig hohe und niedrige Werte an. Durch den Parameter EX, bei dem die Verteilung der Amplitudenwerte des "Error-Signals" bestimmt wird, fand Davis (1976b) ein Maß für die Verrauschtheit des Signals zwischen den peaks. Ein eben solches Maß ist der Parameter LES: bei sich bessernder Stimmfunktion sollten die Geräuschanteile zwischen den "peaks" sich verringern und dadurch auch das Integral über das "Error-Signal" und der Wert des Parameters LES. Wie beim AP erfolgt die Angabe der Werte des LES in willkürlichen Einheiten.

3.3.2. Akustische Parameter im Frequenzbereich

Für jeden Patienten und jede Sitzung wird mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation das gemittelte Spektrum über den als stimmhaft erkannten Sprachschall bestimmt. Veränderungen im Spektrum werden durch die folgenden Verfahren erfaßt:

8.) Faktor Alpha (ALPHA). Dieser Parameter ist definiert als das Verhältnis zwischen der Energie oberhalb 1000 Hz und der Energie unterhalb 1000 Hz (Froekjaer-Jensen und Prytz 1974, 1976). ALPHA erfaßt Veränderungen der Energieverteilung im Spektrum im Verlauf der Therapie. Über seine Entwicklung können keine Annahmen gemacht werden, weil sie inter-individuellen Variationen unterliegt (Froekjaer-Jensen und Prytz 1976).

Es wird allerdings erwartet, daß ALPHA den individuellen Verlauf der Therapie, der sich in spektralen Veränderungen zeigt, sehr empfindlich widerspiegelt.

9.) Lineare spektrale Tendenz (LST). Um Veränderungen im Spektrum im Einzelnen darzustellen, wird in 64 aufeinanderfolgenden Bandbereichen zwischen 0 und 10000 Hz die Veränderung der spektralen Energie der gemittelten Spektren im Verlauf der Therapie durch Anpassung an eine Gerade dargestellt. Auch über die Entwicklung dieses Parameters können wegen interindividueller Differenzen keine Vorannahmen gemacht werden. Es wird aber erwartet, daß sich bei der Darstellung des LST wichtige spektrale Bereiche herausstellen, in denen sich Veränderungen im Verlauf einer Stimmtherapie besonders deutlich zeigen. Um die spektralen Veränderungen, die der Berechnung der LST zugrunde liegt, anschaulich zu verdeutlichen, wird von einer Versuchsperson ein Drei-D-Plott angefertigt, der die Intensitätsänderungen in Abhängigkeit von der Frequenz und der Zeit wiedergibt. Der Vorschlag zur Berechnung der linearen spektralen Tendenz stammt von Simon (1979: pers. Mitteilung).

3.3.2.4 Vorgehen bei der akustischen Auswertung

Die Tonbandaufnahmen, die von den Patienten bei jeder Sitzung gemacht worden waren, mußten für die automatische Verarbeitung durch den Rechner so aufbereitet werden, daß nur die von den Patienten produzierte Liste von "items" analysiert wurde. Zu diesem Zweck wurden zunächst im Tonstudio des Instituts für Phonetik die "items" herausgeschnitten. Später, nachdem die entsprechenden Programme fertiggestellt waren, war es möglich, die Aufbereitung des Materials gleich am Rechner durchzuführen. Dabei wird auf dem Magnetband des Rechners eine digitale Kopie der Analogaufnahme hergestellt. Danach erscheint das digitalisierte Signal auf dem Bildschirm und die Cut-Grenzen werden mit dem Lichtgriffel markiert. Ein weiteres Programm komprimiert die Aufnahme auf dem Digitalband so, daß nur noch die von der Versuchsperson produzierten items vorhanden sind. Dem Rechner werden zusätzlich zu den Grenzen zwischen den einzelnen items Anfang und Ende jeder einzelnen Sitzung eingegeben.

Die Werte der Parameter werden für jede Sitzung bestimmt. Für jede Versuchsperson kann daraufhin die Entwicklung der einzelnen Parameter im Therapieverlauf durch ein vom Plotter angefertigtes Diagramm dargestellt werden. Die Veränderung der Werte im Verlauf der Therapie wird automatisch durch eine Spline-Funktion angepaßt, die den Mittelwert und den Fehler bei jeder Berechnung berücksichtigt. In Abb.3.4.a - 3.4.i sind für die Versuchsperson 1 die ermittelten Werte und die Anpassung durch die spline-Funktion dargestellt.

3.3.3 Auditive Beurteilung

3.3.3.1 Vorüberlegungen

Das Fernziel dieser Untersuchung besteht in der Entwicklung von Methoden, mit deren Hilfe Stimmbefunde objektivierbar sind. Ein Problem, das auf dem Weg zur Verwirklichung dieses Ziels noch gelöst werden muß - wozu in dieser Arbeit allenfalls ein kleiner Beitrag geleistet werden kann - besteht in der Klärung des Zusammenhangs zwischen akustischen Parametern und den perzeptiven Termini der Stimmbewertung. Die Zahl der perzeptiven Termini, mit denen Stimmstörungen beschrieben werden, ist fast unübersehbar groß (vgl. z.B. Nessel 1961; Pahn und Pahn 1975; Klingholz 1978). Nur wenige Untersuchungen liegen bisher vor, in denen versucht wurde, diese Termini inhaltlich zu ordnen - wobei mit Techniken der Faktorenanalyse wie dem Osgood'schen semantischen Differential gearbeitet wird - oder ihnen akustischen Korrelate zuzuordnen (Isshiki, Okamura, Tanabe und Morimoto 1969; Takahashi und Koike 1975; Isshiki und Takeuchi 1970; Fritzell, Hammarberg und Wedin 1977; Gauffin und Sundberg 1977). In keiner dieser Untersuchungen sind pathologische Stimmen im Verlauf ihrer Therapie mit perzeptiven Termini beschrieben worden. Es ist aber gerade dann, wenn Veränderungen der Stimme durch akustische Verfahren erfaßt werden sollen, wichtig, eine Kontrolle darüber zu haben, ob sich die Qualität der Phonation tatsächlich ändert. Die Möglichkeit einer solchen Überprüfung ist durch die laryngoskopischen Befunde gegeben und auch durch eine auditive Beurteilung. Daher wurden die Stimmen

der Patienten durch eine Gruppe von Transkribenden bewertet, die über eine langjährige Erfahrung in der Deskription von defektivem Sprachmaterial verfügen.

Die Termini, die zur auditiven Beschreibung eingesetzt wurden, wurden nach den folgenden drei Kriterien zusammengestellt: Erstens sollten an den physiologischen, akustischen und perzeptiven Gegebenheiten des in dieser Arbeit untersuchten Materials orientiert sein. Zweitens sollte der Katalog der beschreibenden Termini so klein wie möglich gehalten werden. Drittens sollten die Termini physiologisch und akustisch so genau wie möglich definiert sein.

3.3.3.2 Termini der auditiven Beurteilung

Die Phonation der Patienten mit Stimmlippenlähmungen ist charakterisiert durch Grundfrequenzunregelmäßigkeiten, Veränderungen der harmonischen Energie und Rauschen im Spektrum. Grundfrequenzvariationen stehen in einem sehr starken Zusammen mit der Wahrnehmung der Stimme als pathologisch verändert. (Klingholz 1978). Durch Variationen aufeinanderfolgender Grundperioden ist der Phonationstyp "creaky voice" definiert (s.o.u.1.3.4). Daher wurde "creaky" als ein Terminus, nach dem die Stimmen der Patienten zu beurteilen waren, ausgewählt.

Phonation mit unvollständigem Glottisschluß, d.h. reduzierter harmonischer Energie und Rauschkomponenten im Spektrum, wird als "breathy" wahrgenommen (Isshiki et al. 1969; Gauffin und Sundberg 1977). "Breathy" ist ein weiterer Terminus, nach dem die Stimmen beurteilt werden sollte. Bei Patienten mit Stimmlippenlähmungen in Intermediärstellung kann es vorkommen, daß in der Glottis nur Turbulenzen entstehen, und die Stimme aphonisch, d.h. ohne harmonische Energie ist. Dieselben physiologischen und akustischen Eigenschaften treffen auf das Flüstern zu. Zur Beurteilung der stimmlosen Phonation wurde der terminologischen Konsistenz wegen die Bezeichnung "whisper" gewählt.

Eine letzte Bezeichnung ist der Terminus "instable", der nach Gauffin und Sundberg (1977) die Wahrnehmung von Fluktuationen der Stimmlippen-schwingung wiedergibt. Er ist hier allgemeiner definiert als ein Terminus, durch den der Eindruck wiedergegeben werden soll, wie sehr die Kontrolle der Phonation eingeschränkt ist. Der Bezeichnung "instable" ist kein akustisches Korrelat direkt zuzuordnen, sondern sie soll zum Zweck der Gesamtbeurteilung der Stimme eingesetzt werden.

3.3.3.3 Vorgehen bei der auditiven Beurteilung

Zur auditiven Beurteilung wurde für jede Versuchsperson die Reihenfolge der Aufnahmesitzungen mit Hilfe eines digitalen Zufallszahlengenerators randomisiert. Nach jeder Darbietung einer Sitzung vermerkten die Transkribenden auf einem Testbogen, ob die oben beschriebenen Termini zutrafen oder nicht. Dabei konnten sie mit Zahlen von "0" für: trifft nicht zu bis "3" für: trifft sehr stark zu antworten. Zusätzlich wurde noch Raum für Bemerkungen gelassen.

Bei der Auswertung, deren Ergebnisse für jeden Patienten aufgeführt sind, wurden die Beurteilungen pro Terminus und Sitzung so zusammengefaßt, daß bei Abweichungen in der Beurteilung der Bereich der Bewertung festgehalten wurde und andernfalls der Wert, der von den Transkribenden übereinstimmend angegeben worden war.

Auch für die auditive Beurteilung gilt, daß keine Normwerte erwartet werden können, etwa in dem Sinn, daß jeder Patient am Ende der Therapie bei jedem Terminus einen Wert von "0" erhalten müßte. Es ist noch nicht möglich, auf gesicherte Ergebnisse zurückzugreifen, anhand derer festgestellt werden könnte, welchen Bedingungen eine z.B. mit "breathy" oder "creaky" beurteilte Phonation als nicht mehr oder wieder gesund betrachtet werden muß. Außerdem ist keine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Patienten untereinander zu erwarten, weil die Stimmen der Patienten einzelnen nicht in Relation zu anderen, vorher gehörten beurteilt werden sollten. Es können also nur relative Tendenzen der auditiven Beurteilung von Stimmen während einer Stimmtherapie zum Ausdruck kommen.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Einführung

Zur Auswertung lagen neben den akustischen die Daten der auditiven Beurteilung und die laryngoskopischen Befunde vor. Die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse ist so aufgebaut, daß zunächst für jeden Patienten einzeln die Entwicklung der akustischen Parameter gemeinsam mit den laryngoskopischen Befunden und den Ergebnissen der auditiven Analyse erörtert wird. Dabei wird für die erste Versuchsperson die Tendenz der Parameter und die Anpassung an die spline-Funktion im Einzelnen gezeigt. Bei den übrigen Versuchspersonen sind die Entwicklungen der Parameter den zusammenfassenden Diagrammen zu entnehmen.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt dabei für jede Versuchsperson auf die folgende, hier in allgemeiner Form wiedergegebenen Weise:

Versuchsperson, laufende Nummer (Angabe des Geschlechts und des Alters in Klammern)

Diagnose

laryngoskopische Befunde (in Klammern: Tag der Erstellung von Behandlungsbeginn an gerechnet)

Anzahl der Tonbandaufnahmen

Tage der Tonbandaufnahmen von Behandlungsbeginn an gerechnet

Die Ergebnisse der auditiven Beurteilung sind in Diagrammen wiedergegeben. Dabei sind in den Reihen die Beurteilungstermini aufgeführt und in den Spalten stehen die Nummern der in die richtige zeitliche Reihenfolge gebrachten Aufnahmesitzungen.

Bei der Beschreibung der akustischen Auswertung wird als erstes das Symbol angegeben, durch das die jeweilige Versuchsperson in den Darstellungen der Parameterentwicklung gekennzeichnet ist.

Anschließend an die Erörterung der Ergebnisse für die einzelnen Versuchspersonen werden die Tendenzen der einzelnen Parameter diskutiert. Die Entwicklungen der Parameter sind dabei den Abb. 3.4.6 bis 3.4 zu entnehmen.

Auf jeder Abbildung sind auf der Abszisse die Werte der Parameter aufgetragen und auf der Ordinate die Zeit seit Beginn der Behandlung in Tagen.

3.4.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse für die erste Versuchsperson

Im folgenden werden die Ergebnisse für die erste Versuchsperson im einzelnen dargestellt. Dabei sind den Abb. 3.4.a bis 3.4.i die Meßwerte der akustischen Parameter zu entnehmen. Die Tendenz der akustischen Parameter wird durch eine "spline"-Funktion verdeutlicht, in deren Berechnung die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Messungen eingehen. Die Mittelwerte sind auf den Abbildungen durch Kreise wiedergegeben, die Standardabweichungen sind durch Längsstriche gekennzeichnet.

Versuchsperson 1 (w., 54 Jahre)

Diagnose:

Rekurrensparese links nach Strumaresektion wegen Struma maligna

Befunde:

- (0) linke Stimmlippe in Intermediärstellung, rechts freie Beweglichkeit
- (580) linke Stimmlippe unbeweglich zwischen Paramedian- und Intermediärstellung, rechts freie Beweglichkeit, kompensatorischer Glottisschluß gelingt vollständig

Anzahl der Aufnahmen: 9,

zwei weitere Aufnahmen konnten nicht in die Analyse einbezogen werden, weil die Patientin im einen Fall stark erkältet war und im anderen Fall durch einen technischen Defekt die Aufnahme stark untersteuert war.

Tage der Aufnahmen: 7, 38, 72, 163, 199, 269, 366, 514, 57

Auditive Beurteilung

Sitzung Terminus	1	2	3	4	5	6	7	8	9
instabil	2 - 3			1 - 2			0 - 1		
whisper	2 - 3			1 - 2			0 - 1		
breathy	2 - 3						1 - 2		
creaky	0 - 1		1 - 2						

Tendenz der akustischen Parameter (Kennung in der Gesamtdarstellung:)

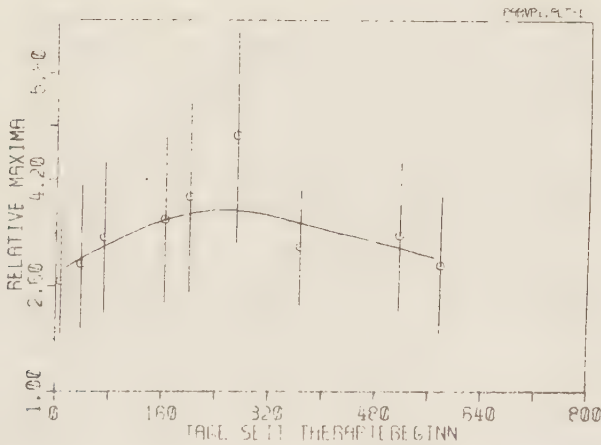
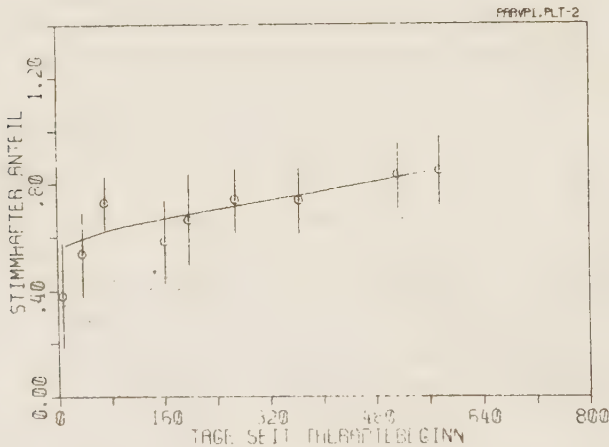


Abb. 3.4.a Tendenz des RMN (Verhältnis zwischen relativen Maxima und Nulldurchgängen)

Bei der Versuchsperson 1 steigt der RMN zunächst an und sinkt dann wieder. Es ist anzunehmen, daß diesem Verlauf der folgende komplexe Zusammenhang zugrunde liegt: die gelähmte Stimmlippe verändert ihre Position leicht zu Medianlinie hin. Die gesunde Stimmlippe auf der anderen Seite nähert

sich der gelähmten. Durch den verringerten Abstand zwischen den Stimmlippen können höherfrequente Rauschkomponenten entstehen, die vorübergehend zu einer Vermehrung der relativen Maxima führen. Mit dem Erreichen des kompensatorischen Glottisschlusses nimmt deren Anteil wieder ab. Bei der auditiven Beurteilung ist allerdings nur eine Abnahme der Bewertung von "breathy" für die letzten drei Sitzungen zu registrieren. Hier ist anzumerken, daß die Bezeichnung "breathy" bzw. der Grad an "breathyness" nicht in Bezug auf die Frequenzen der Geräuschanteile definiert ist. Ob die in den akustischen Meßwerten wiedergegebenen Eigenschaften des Signals perzipiert wurden, kann also in diesem Fall nicht entschieden werden.

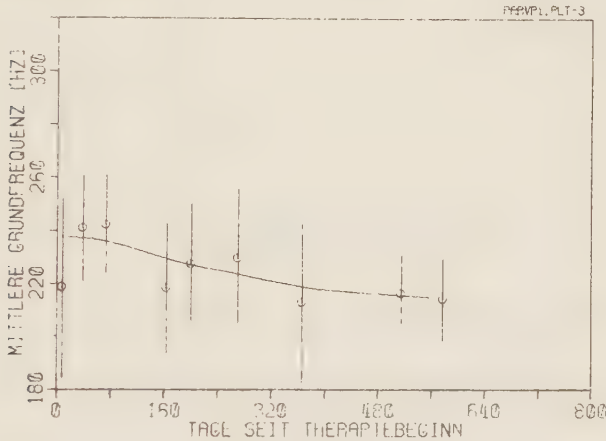


ANTEIL STIMMHAFTER SPRACHSCHALLS

Abb. 3.4.b Tendenz des ASS (Anteil des als stimmhaft erkannten Sprachschalls im Verhältnis zum Gesamtsprachschall)

Der ASS steigt erwartungsgemäß an. Die Patientin erhielt anfangs hohe Werte für den Terminus "whisper". Entsprechend niedrig ist der Anteil des als stimmhaft erkannten Sprachschalls vor allem in der ersten Sitzung, und entsprechend groß die Standardabweichung der Meßwerte für

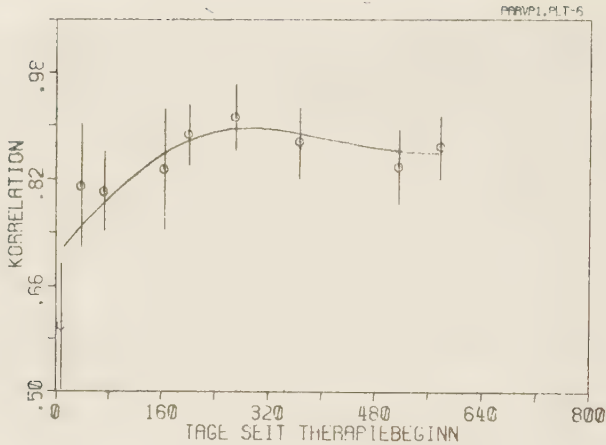
alle Parameter bei dieser Sitzung. Daher werden bei der Anpassung durch die spline-Funktion die Mittelwerte vor allem bei dieser ersten Sitzung nicht so stark berücksichtigt wie bei Messungen mit geringeren Standardabweichungen.



MITTLERE GRUNDFREQUENZ

Abb. 3.4c Tendenz des MGF (mittlere Grundfrequenz)

Die mittlere Grundfrequenz nimmt im Verlauf der Therapie um ungefähr 20 Hz auf einen Wert von 220 Hz ab.

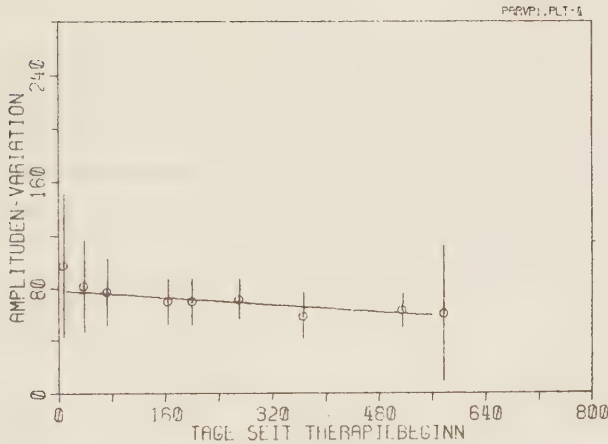


PERIODEN-KORRELATIONS-KOEFFIZIENT

Abb. 3.4.f Tendenz des KK (Periodenkorrelationskoeffizient)

Gemäß der erwarteten Tendenz steigt der KK an und zeigt dadurch den besseren Stimmlippenschluß und die daraus resultierende erhöhte harmonische Energie im Signal. Ebenso wie der PP steigt er besonders zu Anfang stark an. Nach diesen Werten zu urteilen verändert sich die Qualität der Stimmlippenschwingung bei den letzten Sitzungen also nicht mehr wesentlich.

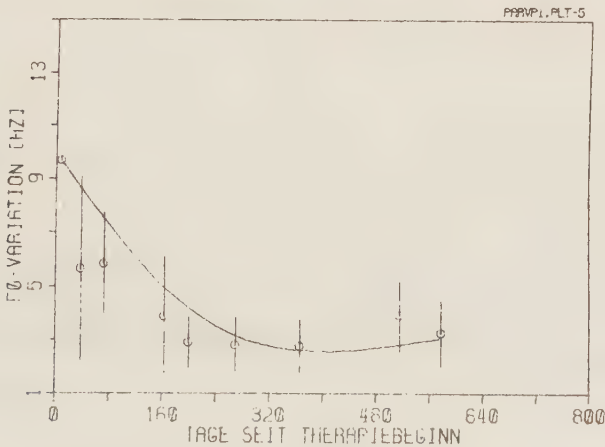
Auch die im PP zum Ausdruck kommenden "pitch perturbations" nehmen erwartungsgemäß ab. Eine starke Abnahme des PP zeigt sich besonders für die ersten vier Sitzungen, danach treten kaum noch Veränderungen auf. In der auditiven Beurteilung kommt die durch den Verlauf des AP und des PP dokumentierte zunehmende Regelmäßigkeit der Stimmlippenschwingung allerdings nicht zum Ausdruck. Nach den Angaben der Transkribenden war der Eindruck der Stimmlosigkeit bei den ersten Sitzungen so groß, daß keine starke "creakyness" wahrgenommen werden konnte. Diese Art von Faktoren der Wahrnehmung spielen für das akustische Verfahren keine Rolle. Wenn im Sprachsignal Modulationen des Luftstroms erkannt werden, was der Fall ist, wenn die Maxima der Autokorrelationsfunktion einen größeren Wert als 0.25 haben, werden an den daraufhin festgelegten Periodengrenzen "pitch perturbations" bestimmt, unabhängig von der Intensität der Schwingung oder von möglicherweise vorhandener Ge-



VARIATION DER PERIODEN-INTENSITÄT

Abb. 3.4.d Tendenz des AP (Variationen aufeinanderfolgender Grundperioden hinsichtlich ihrer Amplitude)

Der AP nimmt gemäß der erwarteten Tendenz ab und zeigt dadurch die zunehmende Regelmäßigkeit der Grundschiwingung an.



VARIATION DER GRUNDFREQUENZ

Abb. 3.4.e Tendenz des PP (Variationen aufeinanderfolgender Grundperioden hinsichtlich ihrer Länge)

räuschkomponenten. Offenbar arbeitet das akustische Verfahren in diesem Fall besser als das menschliche Ohr. Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang noch auf die Tatsache, daß bei dieser Patientin nach der Entwicklung der Werte für Grundfrequenzunregelmäßigkeiten die Phonation nicht die Eigenschaft hatte, die bei Intermediärstellungen häufig beobachtet wird (vgl. o.u. 2.3): trotz der offenen Glottis waren die Stimmlippenschwingungen am Anfang extrem unregelmäßig.

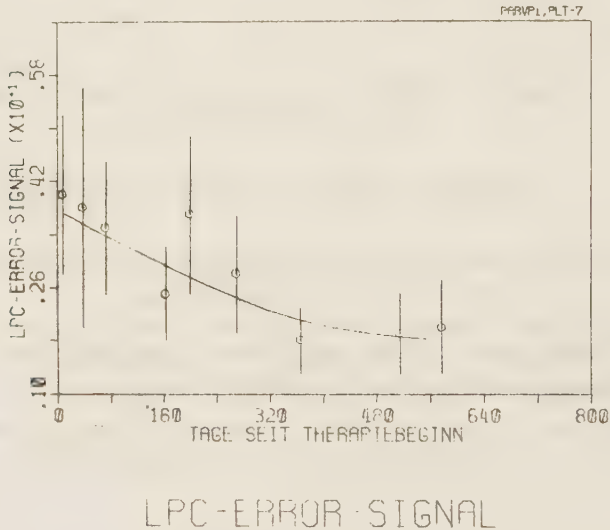
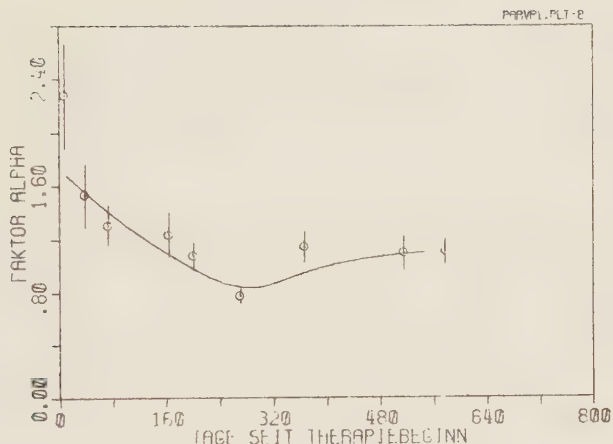


Abb. 3.4.g Tendenz des LES (Integral über die sich bei der linearen Prädiktion ergebenden "Error"-Funktion)

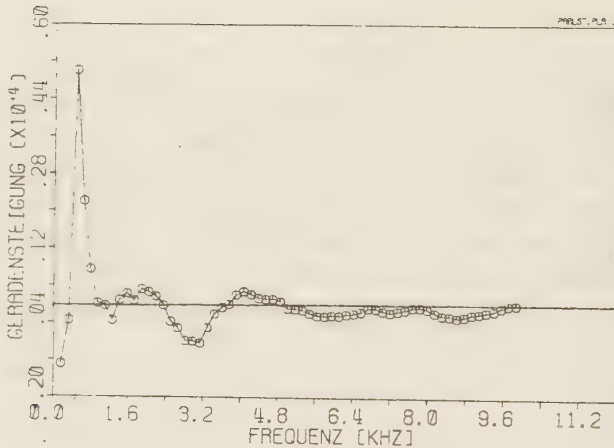
Der LES nimmt erwartungsgemäß ab und zeigt damit die zunehmende Periodizität und die Abnahme von Geräuschteilen im Signal. Auch hier ist wie beim KK und beim PP die Veränderung am Anfang der Therapie größer als zum Schluß.



VERHAELTNIS $> 1000\text{ Hz} / < 1000\text{ Hz}$

Abb. 3.4h Tendenz des Faktors ALPHA (Verhältnis zwischen der Energie oberhalb 1000 Hz und der Energie unterhalb 1000 Hz)

Der Faktor ALPHA sinkt, wodurch eine Anhebung der spektralen Komponenten unterhalb 1000 Hz zum Ausdruck kommt, während höherfrequente Energie abnimmt. Die lineare spektrale Tendenz (Abb. 3.4.s, vergl. dazu auch den Drei-D-Plott in Abb. 3.4y, der für diese Patientin zur Verdeutlichung der spektralen Veränderungen angefertigt wurde) zeigt dementsprechend einen Energieanstieg unterhalb 1000 Hz und eine Abnahme in höherfrequenten Bereichen, und dabei besonders im Bandbereich um 3000 Hz. Bei dem hier vorliegenden Befund einer Intermediärstellung muß es sich dabei um Rauschfrequenzen handeln, die im Verlauf der Therapie durch den verbesserten Stimmlippenschluß abnehmen. In dem leichten Energieanstieg im Bereich um 4000 Hz ist möglicherweise das höherfrequente Rauschen zu sehen, das zeitweilig zu einem Anstieg des RMN geführt hat.



LINEARE SPEKTRALE TENDENZ

Abb. 3.4.i Lineare spektrale Tendenz (LST)

Abschließend kann zu den Ergebnissen der akustischen Analyse gesagt werden, daß bei der Versuchsperson 1 entsprechend der auditiven Gesamtbeurteilung der Stimme als zunehmend weniger instabil und entsprechend den verbesserten laryngoskopischen Befunden die Parameter ASS, AP, PP, KK und LES den Therapieerfolg anzeigen. Im Spektrum nimmt die Energie unterhalb 1000 Hz zu und oberhalb 1000 Hz ab. Die meisten Parameter verändern sich zu Anfang stark, während bei den letzten vier Sitzungen keine großen Unterschiede bei den Werten zu erkennen sind. Möglicherweise war zu diesem Zeitpunkt der als Therapieerfolg zu wertende kompensatorische Glottisschluß bereits eingetreten.

3.4.3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse für die übrigen Versuchspersonen

Versuchsperson 2 (w, 45 J.)

Diagnose:

Rekurrensparese rechts durch eine rezidivierende Struma

(3) Strumaresektion¹⁴

¹³ Bei dieser Patientin war die Ursache der Stimm lippenlähmung die Struma selbst und deren Entfernung die erste therapeutische Maßnahme. Sie erfolgte drei Tage nach der ersten Aufnahme, der aus technischen Gründen in den Diagrammen der akustischen Parameter mit "0", d.h. als Tag des Therapiebeginns gekennzeichnet werden muß. Die Patientin wurde nicht in der HNO-Klinik der Universität therapiert. Frau Dr.med.Full-Scharrer ist für den laryngoskopischen Befund herzlich zu danken.

Befunde:

(0) Rechte Stimmlippe in Paramedianstellung, Adduktionsimpulse vorhanden

Anzahl der Aufnahmen: 5

Aufnahmetage: 0, 17, 46, 97, 144

Auditive Beurteilung:

Sitzung Terminus	1	2	3	4	5
instabil	2 - 3			0 - 1	
whisper	0 - 1			0	
breathy	1 - 2			0 - 1	
creaky	2 - 3			1 - 2	

Tendenz der akustischen Parameter (Kennung: ⊙)

Alle akustischen Parameter, über deren Entwicklung Vorannahmen gemacht werden konnten, zeigen die erwartete Tendenz. Der RMN (Abb. 3.4k) nimmt ab und entspricht damit der auditiven Beurteilung der Stimme als zunehmend weniger "breathy". Der ASS (Abb. 3.4.l) zeigt eine, allerdings nur leicht, zunehmende Tendenz. Dementsprechend ergaben sich bei der auditiven Analyse bereits anfangs nur sehr geringe Werte für "whisper". Die mittlere Grundfrequenz sinkt, wie der MGF (Abb. 3.4.m) anzeigt. Die Amplitudenvariationen nehmen ab, ebenso die Grundfrequenzvariationen. Die Parameter AP (Abb. 3.4.n) und PP (Abb. 3.4.o) reflektieren somit die Beurteilung der Stimme als zunehmend weniger "creaky". Auch der KK (Abb. 3.4.p) steigt an, und läßt die zunehmende Periodizität der Schwingungen erkennen. Allerdings ist die Veränderung nicht groß. Der Parameter LES (3.4q) sinkt bei dieser Versuchsperson ab und zeigt die Abnahme von Geräuschanteilen und die verbesserte Periodizität im Signal. Der Fakto ALPHA (Abb. 3.4.r) steigt zuerst leicht an und

sinkt dann ab: Das bedeutet eine im Therapieverlauf reduzierte spektrale Energie oberhalb 1000 Hz und einen Anstieg der Energie unterhalb 1000 Hz. Aus der Darstellung des LST (Abb. 3.4.t) ist zu ersehen, daß die spektrale Energie im Bandbereich um 400 Hz besonders stark zunimmt. Abgesehen von einer leichten Energiezunahme im Bandbereich um 1600 Hz nimmt die Energie in den übrigen spektralen Bereichen ab.

Die auditive Gesamtbeurteilung der Stimme als zunehmend weniger instabil und die durch die laryngoskopischen Befunde bestätigte Rehabilitation entsprechen der Tendenz der Parameter RMN, ASS, AP, PP, KK und LES. Im Spektrum des Sprachsignals macht sich die verbesserte Stimmfunktion durch eine Zunahme der Energie in unteren und eine Abnahme der Energie in oberen Frequenzen bemerkbar.

Versuchsperson 3 (m., 54 J.)

Diagnose:

idiopathische Rekurrensparese rechts.

Befunde:

Es lagen keine laryngoskopischen Befunde vor. Nach Beurteilung der behandelnden Logopädin:

(0) Paramedianstellung

(46) auditiv deutlich wahrnehmbarer Therapieerfolg

Anzahl der Aufnahmen: 3

Aufnahmetage: 0, 35, 46.

Auditive Beurteilung:

Sitzung Terminus	1	2	3
instabil	1 - 2	0 - 1	
whisper	1 - 2	0	
breathy	2 - 3	2	0 - 1
creaky	2 - 3	1 - 2	

Tendenz der Akustischen Parameter (Kennung: Δ)

Bei dieser Versuchsperson zeigen drei der sechs Parameter, über deren Entwicklung Vorannahmen gemacht werden konnten, die erwartende Tendenz. Der RMN (Abb. 3.4.k) sinkt und spiegelt die Beurteilung der Stimme als abnehmend breathy wieder. Der ASS nimmt entgegen der erwarteten Tendenz ebenfalls ab (Abb. 3.4.l). Der MGF (Abb. 3.4.m) sinkt um etwa 10 Hz. Die Amplitudenvariationen und die "pitch perturbations" nehmen ebenfalls ab (Abb. 3.4.n und 3.4.o), und entsprechen damit der Beurteilung der Stimme als zunehmend weniger "creaky". Der KK (Abb. 3.4.p) zeigt allerdings nicht die erwartete Tendenz, und auch der LES (Abb. 3.4.q) steigt an. Nach diesen beiden letzten Parametern nähme also die Periodizität der Schwingung ab. Der Faktor ALPHA (Abb. 3.4.r) nimmt stark zu und zeigt damit einen Anstieg der Energie oberhalb 1000 Hz und ein Absinken der Energie unterhalb 1000 Hz. Aus dem LST (Abb. 3.4.u) ist ein starker Energieabfall im Bandbereich zwischen 200 und 400 Hz erkennbar, dem ein, allerdings vergleichsweise geringer, Energieanstieg zwischen 600 und 1600 Hz bzw. 2200 und 2400 gegenüber steht.

Die auditive Gesamtbeurteilung der Stimme als zunehmend weniger instabil und die Beurteilung der behandelnden Logopädin spiegeln sich in der Tendenz der Parameter RMN, AP und PP wieder. Die verbesserte Stimmfunktion zeigt sich bei diesem Patienten in einer Abnahme der Energie im 400 Hz Bereich und in einer leichten Zunahme im Frequenzbereich bis 2600 Hz.

Versuchsperson 4 (w., 67 J.)

Diagnose:

Rekurrensparese rechts nach Strumaresektion

Befunde:

(0) rechte Stimmlippe unbeweglich in Paramedianstellung

- (100) nur noch leichte Bewegungseinschränkungen rechts
 (156) keine Bewegungseinschränkungen mehr, nur noch einige
 Behandlungen notwendig
 (187) Stimm lippenbewegungen fast seitengleich, Wiedervorstellung
 zur Kontrolle in 4 Wochen.

Anzahl der Aufnahmen: 6

Aufnahmetage: 14, 50, 76, 107, 141, 225

Auditive Beurteilung

Sitzung Terminus	1	2	3	4	5	6
instabil	2 - 3			1 - 2		
whisper	0 - 1					
breathy	0 - 3			1 - 2		
creaky	2 - 3			1 - 2		

Tendenz der akustischen Parameter (Kennung: +)

Vier der sechs akustischen Parameter, über deren Entwicklung Vorannahmen gemacht werden konnten, zeigen bei dieser Versuchsperson die erwartete Tendenz. Der RMN (Abb. 3.4.k) sinkt, allerdings nur zu Anfang und zeigt für die letzten drei Sitzungen keine Veränderten Werte mehr. Die auditive Beurteilung zeigt allerdings eine gegenläufige Tendenz: Die Phonation wird

erst für die letzten drei Sitzungen als mehr "breathy" empfunden. Die Verrauschtheit des Signals, die sich aus den Anfangswerten für den akustischen Parameter und die aufgrund des ersten laryngoskopischen Befundes sehr wahrscheinlich vorhanden waren, in diesem Fall offenbar nicht perzipierbar. Möglicherweise war in die Wahrnehmung der Grundfrequenzunregelmäßigkeiten, die sich in der Bewertung für "creaky" und auch im Parameter AP (Abb. 3.4.n) zeigt, vorrangig eindrucksvoll. Der ASS (Abb. 3.4.l) steigt an, es werden immer mehr Produktionen als stimmhaft erkannt. Der MFG steigt an. Die Abnahme der Unregelmäßigkeiten der Grundfrequenz, die in der auditiven Beurteilung als weniger "creaky" zum Ausdruck kommt, zeigt sich in der Abnahme des AP (Abb. 3.4.n). Der PP (Abb. 3.4.o) dagegen vergrößert sich nach einer leichten Abnahme wieder etwas, der KK (Abb. 3.4.p) nimmt nach einer anfänglichen Zunahme wieder etwas ab. Die zunehmende Periodizität des Signals zeigt sich hingegen in der Entwicklung des Parameters LES (Abb. 3.4.q).

Der Faktor ALPHA (Abb. 3.4.r) zeigt bei dieser Versuchsperson insofern einen interessanten Verlauf, als er erst steigt, dann abnimmt, schließlich wieder steigt. Die auditive Beurteilung ergibt keinen Hinweis auf dieses Verhalten des ALPHA-Parameters. Aus dem LST (Abb. 3.4.v) ist ersichtlich, daß die spektrale Energie im Bereich zwischen 200 und 400 Hz stark abnimmt, zwischen 600 und 1200 Hz im Verlauf der Therapie hingegen zunimmt. Unterhalb der 1000 - Hz - Grenze, die zur Berechnung des Faktors ALPHA herangezogen wird, ereignen sich also sowohl Energiezunahmen, als auch Energieabnahmen. Dadurch ließe sich das für diese Patientin spezifische Verhalten des ALPHA-Parameters erklären. Hinzuweisen ist noch auf die leichte Energiezunahme im Bandbereich um 4000 Hz. Dabei dürfte es sich um Geräuschanteile handeln, die zur vermehrten Perzeption von "breathy" geführt haben und die sich im RMN in einer Stabilisierung nach vorheriger Abnahme äußern. Deren Auftreten sollte jedoch in Anbetracht des Alters der Patientin nicht als pathologisch gewertet werden.

Insgesamt ergibt sich entsprechend der auditiven Beurteilung der Stimme als zunehmend weniger instabil und in Übereinstimmung mit den verbesserten laryngoskopischen Befunden die erwartete Tendenz bei den Parametern RMN, ASS, AP und LES. Im Spektrum zeigt sich die verbesserte Stimmfunktion durch starke Energieabnahmen im Bereich um 400 Hz und Zunahmen zwischen 600 und 1200 Hz.

Versuchsperson 5 (w., 45 J.)

Diagnose:

Rekurrensparese links nach Strumaresektion

Befunde:

(0) linke Stimmlippe in Paramedianstellung

(113) seitengleiche Beweglichkeit

Anzahl der Aufnahmen: 4

Aufnahmetage: 6, 42, 73, 120

Auditive Beurteilung:

Sitzung Terminus	1	2	3	4
instabil	2 - 3		0 - 1	
whisper	1 - 2		0 - 1	
breathy	2 - 3		1 - 2	
creaky	1 - 2		1	

Tendenz der akustischen Parameter (Kennung: X)

Während der RMN (Abb. 3.4.k) und der LES (Abb. 3.4.q) zunehmen, zeigen alle übrigen Parameter, über deren Veränderungen Vorannahmen gemacht werden konnten, die erwartete Tendenz. Eine mögliche Erklärung für die Entwicklung der Parameter RMN (Abb. 3.4.k) und LES (Abb. 3.4.q) liegt darin, daß die Phonation bis zum Schluß noch relativ hohe Bewertungen für "breathy" erhielt, was die Patientin selbst allerdings als eine normale Eigenschaft ihrer Stimmgebung bezeichnete. Es ist nicht auszuschließen, daß diese habituelle "breathyness" zu sehr hochfrequenten Geräuschanteilen führt, die viele relative Maxima liefern. Der ASS (Abb. 3.4.l) steigt an und stimmt in diesem Fall mit der abnehmenden Bewertung für "whisper" überein. Der MGF (Abb. 3.4.m) steigt ebenfalls an. Der AP (Abb. 3.4.n) sinkt und spiegelt noch besser als der PP (Abb. 3.4.o), der nur leicht sinkt, die zunehmende Regelmäßigkeit der Grundgeschwindigkeit wieder. Diese äußert sich auch in der Abnahme der Werte für "creaky" bei der auditiven Beurteilung. Der KK steigt an und zeigt die verbesserte Periodizität der Stimmlippenschwingung bei der Phonation. Der LES (Abb. 3.4.q) nimmt hingegen, wie oben bereits erwähnt, entgegen der erwarteten Tendenz zu.

Der Faktor ALPHA sinkt ab und dieser Abnahme entspricht die im LST (Abb. 3.4.w) erkennbare starke Zunahme der Energie im Bereich zwischen 200 und 400 Hz. Im Bandbereich zwischen 1000 und 1400 Hz zeigt die spektrale Energie eine abnehmende Tendenz,

In Obereinstimmung mit der auditiven Gesamtbeurteilung der Stimme als zunehmend weniger instabil und den laryngoskopischen Befunden zeigen die Parameter ASS, AP, PP und KK die Verbesserung der Stimme bei dieser Patientin an. Die entsprechende Veränderung im Spektrum zeigt sich bei dieser Patientin besonders im Bereich zwischen 200 und 400 Hz.

Versuchsperson 6 (w., 24 J.)

Diagnose:

Rekurrensparese rechts nach Strumaresektion

Befunde:

(0) rechte Stimmlippe in Paramedianstellung

(64) rechte Stimmlippe in Intermediärstellung

(167) rechte Stimmlippe beweglich, jedoch Einschränkungen
im Vergleich zu links

(26 5) Fast seitengleiche Beweglichkeit, subjektive Angabe der
Patientin: die Stimme ist wieder wie vor der Erkrankung

Anzahl der Aufnahmen: 6

Aufnahmetage: 25, 64, 88, 132, 155, 256

Auditive Beurteilung:

Sitzung	1	2	3	4	5	6
Terminus						
instabil	2 - 3	1 - 2	1		0 - 1	
whisper	1 - 2		0-1			
breathy	2 - 3		1 - 2			1
creaky		1 - 2				

Tendenz der akustischen Parameter (Kennung:◇)

Bei dieser Patientin sind es zwei der sechs akustischen Parameter, über deren Entwicklung Vorannahmen gemacht werden konnten, die sich gemäß der erwarteten Tendenz verändern. Der RMN (Abb.3.4.k) nimmt ab und zeigt die verminderte Verrauschtheit des Signals an, die auch in der auditiven Beurteilung der Stimme als zunehmend weniger "breathy" zum Ausdruck kommt. Der ASS (Abb. 3.4.l) nimmt dagegen leicht ab. Der MGF (Abb. 3.4.m) sinkt ebenfalls leicht. Die Grundschiwingung wird nur bezüglich ihrer Amplitude regelmäßiger, wie aus den Werten für den AP (Abb. 3.4.n) hervorgeht. Der PP (Abb. 3.4.o) dagegen erhöht sich leicht. Ähnliches gilt für den KK, der im Verhältnis zu den anderen Versuchspersonen die höchsten Werte hat und sich im Verlauf der Therapie etwas erniedrigte. In diesem Zusammenhang ist auf die auditive Beurteilung der Stimme für "creaky" hinzuweisen, bei der die Anfangswerte im Vergleich zu anderen Versuchspersonen nicht hoch sind und die Bewertung sich auch kaum verändert. Nach den Ergebnissen der akustischen Analyse und auch nach der auditiven Beurteilung entspricht dies es Bild einer "typischen Intermediärstellung (vergl. u. 2.3), bei der die Stimmlippen ohne Kontakt periodengleich schwingen. Die Werte für den PP und den KK auch die Entwicklung des LES (Abb.3.4.q) sprechen dafür, daß sich mit dem Kontakt, der sich zwischen den Stimmlippen bei der Phonation einstellt, die Periodizität der Schwingung, wenn auch nur leicht, verschlechtert.

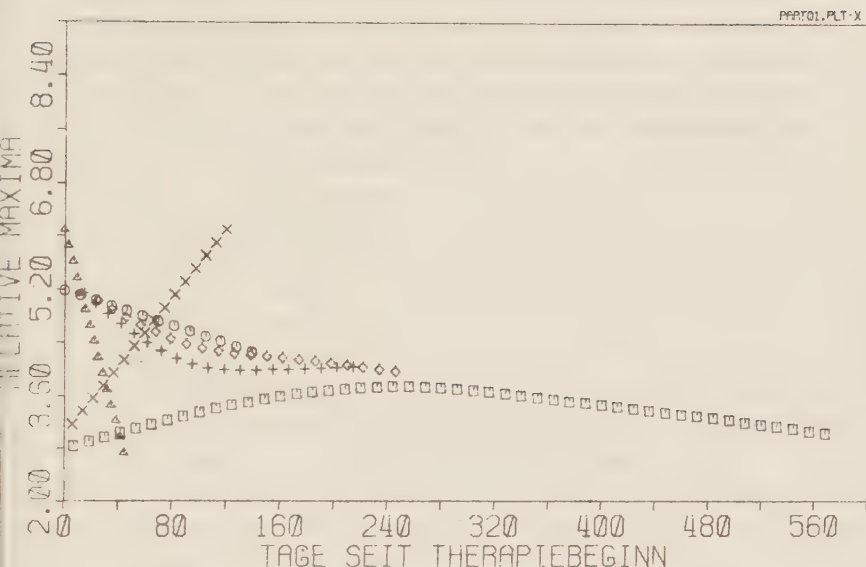
Hinzuweisen ist außerdem auf die laryngoskopischen Befunde, nach denen ein Wechsel von der Paramedian- zur Intermediärstellung stattgefunden hat. Auditiv war diese Positionsveränderung nicht wahrnehmbar, und auch bei den akustischen Parametern hätten sich bei einer anfänglichen Paramedianstellung im Vergleich mit einer folgenden Intermediärstellung vor allem bei den Werten für die Unregelmäßigkeit der Grundschiwingung deutlicher, nämlich schlechtere Ergebnisse, zeigen müssen. Daß dies nicht der Fall ist, läßt

den Schluß zu, daß der Positionswechsel, der 65 Tage nach Therapiebeginn festgestellt worden ist, bereits vor der ersten Tonbandaufnahme, die am 25. Tag gemacht wurde, eingetreten ist.

Die Entwicklung des Faktors ALPHA (Abb. 3.4.r) zeigt bei dieser Versuchsperson einen ähnlichen Verlauf wie bei der Versuchsperson 4: Er steigt erst an, sinkt ab und steigt wieder. Aus dem LST (Abb. 3.4.x) ist ersichtlich, daß sich in diesem Fall, ähnlich wie bei der Versuchsperson 4 die spektrale Energie im Bandbereich zwischen 200 und 400 Hz stark vermindert, zwischen 600 und 1000 Hz dagegen stark zunimmt. Auch hier sind also unterhalb der für den ALPHA-Parameter relevanten 1000-Hz-Grenze sowohl Energiezunahmen als auch -abnahmen zu verzeichnen, die den Verlauf ALPHA erklären können. Abgesehen von diesen Verschiebungen nimmt im Bereich um 4000 Hz die spektrale Energie leicht ab.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß bei dieser Versuchsperson in Übereinstimmung mit den laryngoskopischen Befunden und der auditiven Beurteilung der Stimme als zunehmend weniger instabil die Parameter RMN und AP den Therapieerfolg anzeigen. Im Spektrum ergeben sich in unteren Bereichen sowohl Energieabnahmen als auch Zunahmen, in höheren spektralen Bereichen nimmt die Energie ab.

3.4.4. Diskussion der akustischen Parameter

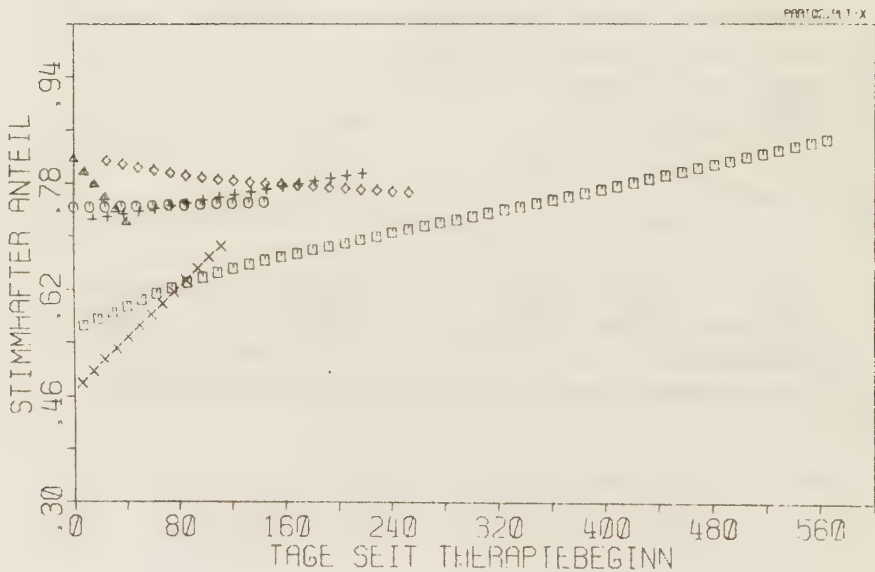


VERHAELTNIS RELATIVE MAXIMA ZU NULLDURCHGAENGEN

Abb. 3.4.k Die Tendenz des RMN (Verhältnis zwischen der Anzahl der relativen Maxima und der Nulldurchgänge)

Bei der Berechnung des RMN wird die Zahl der relativen Maxima des Sprachsignals im Verhältnis zur Zahl der Nulldurchgänge bestimmt. Der RMN nimmt bei vier Versuchspersonen ab. Bei der Versuchsperson 1 nimmt der RMN erst zu und dann wieder ab, bei der Versuchsperson 5 nimmt er entgegen der erwarteten Tendenz zu. Die nicht erwartungsgemäßen Zunahmen des RMN können aus den individuellen Therapieverläufen erklärt werden: Bei der Versuchsperson 1 stellte sich ein kompensatorischer Glottisschluß ein, der vorübergehend zu einem höherfrequenten Rauschen und damit zu einer Zunahme der relativen Maxima führen kann. Bei der Versuchsperson 5 steigt der RMN sehr steil an, die hochfrequenten Geräuschanteile, die im Verlauf der

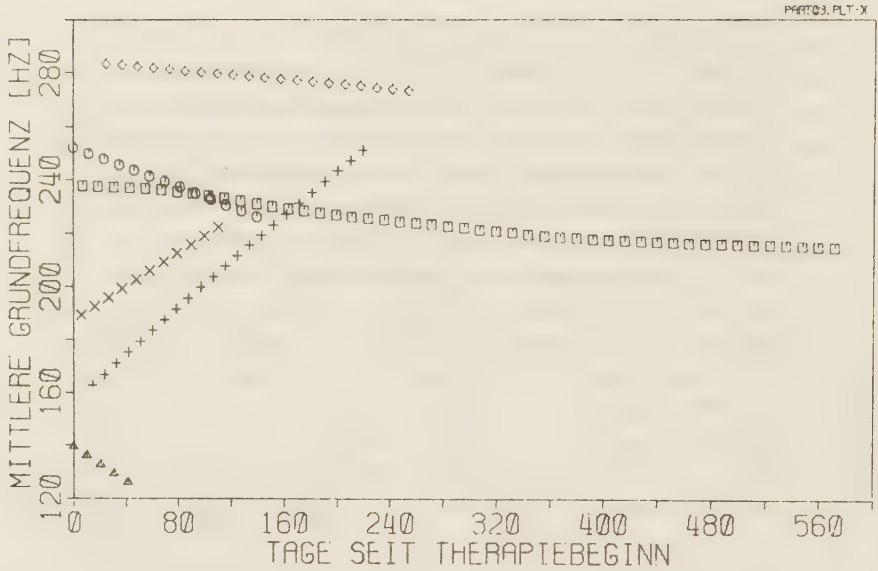
Therapie dazu führen, können durch eine habituelle, aber nicht mehr als pathologisch wahrnehmbare oder zu bezeichnende "breathyness" begründet werden. Die Abnahme des RMN bei den übrigen Versuchspersonen zeigt die erwartete Reduktion von Geräuschanteilen bei der Therapie. Der RMN, der hier erstmals zur akustischen Kennzeichnung im Bereich der Stimmpathologie eingesetzt wurde, ist demnach als vielversprechend anzusehen, besonders zum Zweck der Feststellung von hochfrequenten Geräuschanteilen im Sprachsignal.



ANTEIL STIMMHAFTEN SPRACHSCHALLS

Abb. 3.4.1 Die Tendenz des ASS (Anteil des als stimmhaft erkannten Sprachschalls im Verhältnis zum Gesamtsprachschall)

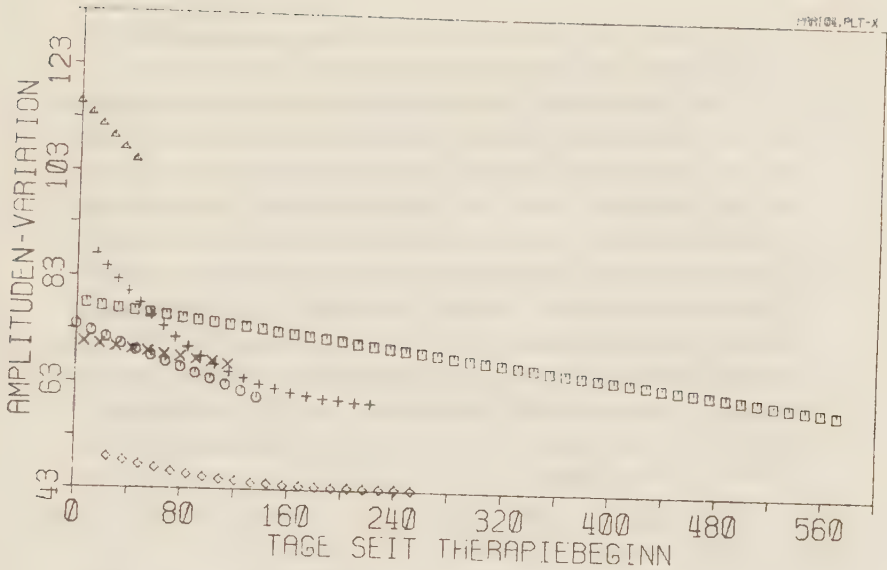
Bei der Berechnung des ASS wird das Verhältnis gebildet zwischen den Anteilen des Sprachschalls, der bei jeder Aufnahmesitzung als stimmhaft erkannt wurde und der Summe aus den als stimmhaft und stimmlos erkannten Anteilen. Der ASS nimmt bei vier der Versuchspersonen erwartungsgemäß zu, bei zweien dagegen ab. Diese Relation läßt den ASS als einen Parameter erscheinen, der eine weitere Überprüfung in der Zukunft verdient. Allerdings sollten gerade bei diesem Parameter die intraindividuellen Variationen stets in Betracht gezogen werden: Die Patienten neigen dazu, am Anfang der Therapie langsam zu sprechen, was sowohl aus der Neuigkeit der Aufnahmesituation als auch aus der Aufmerksamkeit der eigenen Stimme gegenüber zu erklären ist. Das wirkt sich auf die vokalischen Segmente der zu produzierenden Liste aus und auch auf die isolierten Vokale. Am Ende der Therapie dagegen neigen die Patienten dazu, schneller zu sprechen, um die Wieder-Beherrschung der Stimmgebung zu dokumentieren. Bei Langzeitanalysen, wie sie in der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, kann sich daher der Anteil der stimmhaften Segmente reduzieren, ohne daß damit eine Verschlechterung der Stimmfunktion verbunden ist. Dies war offenbar bei den Versuchspersonen 3 und 6 der Fall. Der ASS sollte daher, obwohl er sich bei vier Versuchspersonen als ein guter Indikator der erfolgreichen Stimmtherapie erwiesen hat, weiterhin überprüft werden, und dies besonders im Zusammenhang mit der Überlegung, wie die zu produzierenden Texte hinsichtlich der stimmlos - stimmhaft -Relation so konstant wie möglich gehalten werden können. Dabei ist an automatische Verfahren zu denken, die diese Konstanz im Nachhinein herstellen, und auch an Konzepte zur Optimierung der Gesprächssituation bei der Aufnahme. Für letzteres ist neben der phonetischen die psychologische Schulung des Aufnahmeleiters allerdings notwendig.



MITTLERE GRUNDFREQUENZ

Abb. 3.4.m Die Tendenz des MGF (Mittlere Grundfrequenz)

Die mittlere Grundfrequenz nimmt im Verlauf der Therapie bei zwei Versuchspersonen zu und bei vier Versuchspersonen ab. Bei den Versuchspersonen 1 und 6 lag eine Intermediärstellung vor und die Abnahme des MGF entspricht der Tendenz, über die bei diesem Befund Vorannahmen gemacht werden konnten. Bei den übrigen 4 Versuchspersonen war eine Paramedianstellung festgestellt worden und die Entwicklung der mittleren Grundfrequenz zeigt die erwarteten interindividuellen Verläufe. Die Notwendigkeit, mehr Kenntnisse über die Physiologie des pathologischen Larynx und der daraus resultierenden akustischen Ereignisse zu gewinnen, zeigt sich besonders in diesen interindividuellen Variationen bei der Entwicklung der Grundfrequenz.

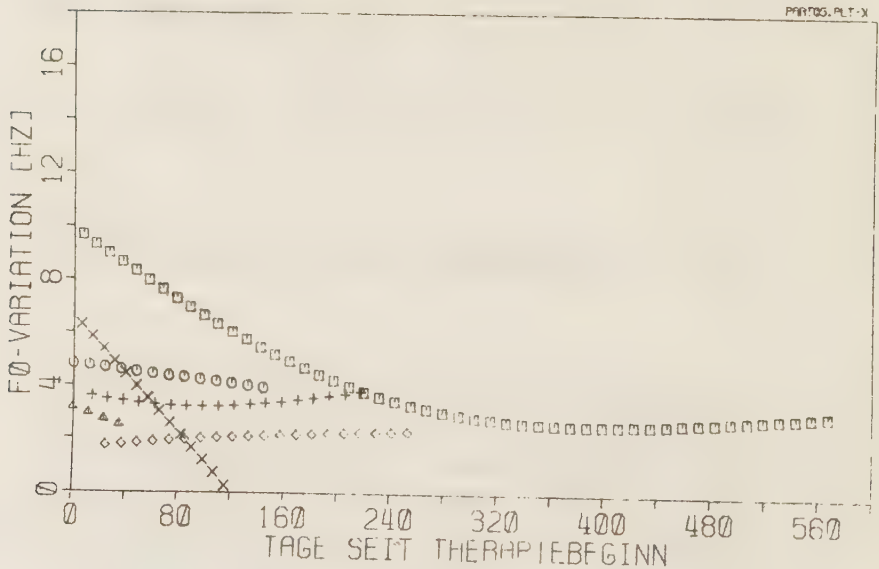


VARIATION DER PERIODEN-INTENSITÄT

Abb. 3.4.n Die Tendenz des AP (Variationen aufeinanderfolgender Grundperioden hinsichtlich ihrer Amplitude)

Bei der Berechnung des AP werden die mittleren Abweichungen der gemittelten Intensität aufeinanderfolgender Grundperioden pro Aufnahmesitzung bestimmt. Der AP als ein Maß für Amplitudenvariationen, von Wendahl (1966b) als "shimmer" bezeichnet, hat sich in dieser Untersuchung als ein guter Indikator für die zunehmende Regelmäßigkeit der Grundschiwingung erwiesen: Er nimmt bei allen sechs Versuchspersonen ab. Allerdings ist er bei der Versuchsperson 6, bei der die Regelmäßigkeit der Grundschiwingung nach der auditiven Beurteilung und im Vergleich zu den übrigen Versuchspersonen vom Beginn bis zum Ende der Therapie groß war, von Anfang an sehr gering.

Seine Abnahme ist der einzige Indikator der zunehmenden Regelmäßigkeit der Grundschiwingung bei dieser Patientin. Daraus läßt sich die Bedeutung der Untersuchung von Amplitudenvariationen bei pathologischen Stimmen ableiten, die auch aus den Ergebnissen von Koike (1973) und Davis (1976b) zu entnehmen ist. Interessant ist die Tendenz des AP bei der Versuchsperson 3, eines männlichen Sprechers: Der AP nimmt zwar ab und dokumentiert damit die verbesserte Ähnlichkeit aufeinanderfolgender Grundperioden, aber seine Werte liegen weit oberhalb der übrigen, weiblichen Stimmen. Eine Klärung des Unterschiedes zwischen weiblichen und männlichen Stimmen hinsichtlich der Amplitudenvariationen zwischen aufeinanderfolgenden Grundperioden erscheint aufgrund dieser Beobachtung erforderlich, um mit dem AP als einem vielversprechenden Parameter arbeiten zu können



VARIATION DER GRUNDFREQUENZ

Abb. 3.4.o Die Tendenz des PP (Variationen aufeinanderfolgender Grundperioden hinsichtlich ihrer Länge)

Zur Berechnung des PP wird für jede Aufnahmesitzung die mittlere Differenz zwischen der Länge aufeinanderfolgender Grundperioden bestimmt und in Hz ausgedrückt. Bei den Versuchspersonen 1,2,3 und 5 nimmt der PP erwartungsgemäß ab und zeigt die bessere Regelmäßigkeit der Grundschiwingung an. Bei der Versuchsperson 4 nimmt der PP nach einer leichten Abnahme wieder zu, und auch bei der Versuchsperson 6 steigen die allerdings von vornherein relativ niedrigen Werte für den PP an. Die Entwicklung des PP gemäß der erwartenden Tendenz bei vier Versuchspersonen weist auf die Eignung der mit "pitch perturbations" (Liebermann 1963) oder "jitter" (Wendahl 1966 b) bezeichneten Variationen der Grundfrequenz hin, nicht nur gesunde von pathologischen Stimmen zu unterscheiden (Liebermann 1963; Koike 1973; Davis 1976b), sondern auch den Verlauf einer Stimmtherapie zu dokumentieren. Allerdings zeigt seine gegenläufige Tendenz bei zwei Versuchspersonen die Notwendigkeit an, den PP nicht als einziges Maß für Unregelmäßigkeiten der Grundschiwingung einzusetzen. Zu ihrer Beurteilung sollten Amplitudenvariationen ebenfalls immer bestimmt werden. Sie nahmen in der vorliegenden Untersuchung bei den Versuchspersonen 4 und 6 ab und zeigten damit besser als der PP die Tendenz zu mehr Regelmäßigkeit der Grundschiwingung im Verlauf der Stimmtherapie.

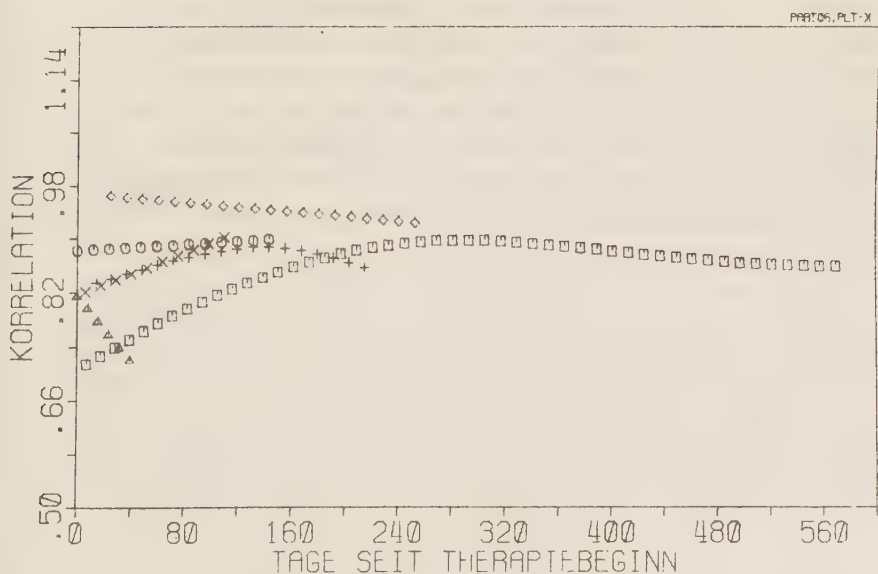
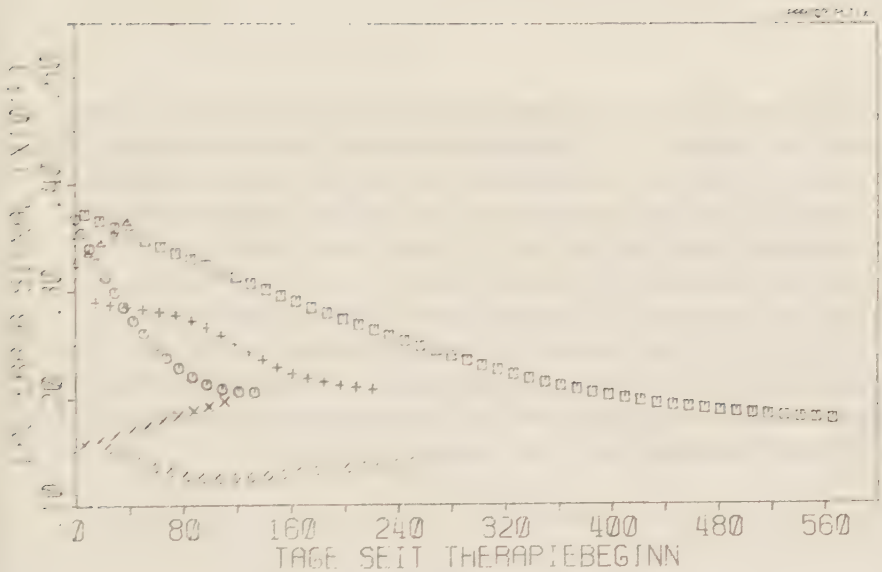


Abb. 3.4. Die Tendenz des KK (Periodenkorrelationskoeffizient)

Zur Bestimmung des KK wird bei jeder Sitzung der mittlere Wert der Maxima der Autokorrelationsfunktion (Ono et al 1976; Davis 1976b) bestimmt. Der KK steigt erwartungsgemäß an bei den Versuchspersonen 1, 2, und 4. Bei den übrigen Versuchspersonen zeigt er nicht die erwartete Tendenz, indem er bei der Versuchsperson drei stark, bei der Versuchsperson 6 leicht abnimmt und bei der Versuchsperson 4 nach einer anfänglichen Zunahme wieder niedrigere Werte annimmt. Der von Davis (1976b) berechnete Parameter PA, der als dem KK entsprechend anzusehen ist, zeigte im Verlauf einer Stimmtherapie keine Veränderung (Davis 1978). Aufgrund dieser Beobachtung und der Entwicklung des KK bei den Versuchspersonen 3, 4 und 6 sollte die Eignung des KK zur Beurteilung eines Stimmtherapieverlaufes in Frage gestellt werden. Andererseits zeigt dieser Parameter besonders bei den Versuchspersonen 1 und 5 sehr deutlich die zunehmende Periodizität der Stimmlippenschwingung. Daher sollte der KK in weiteren Untersuchungen erst noch überprüft werden, bevor seine Eignung zur Messung eines Therapieerfolges bestritten wird. Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang wieder auf die Werte des KK für die männliche Versuchsperson 3. Sie sind, besonders im Gegensatz zu den Werten für die weibliche Versuchsperson 6, von Anfang an sehr niedrig, und am Ende der Therapie wurde für die Versuchsperson 3 der vergleichsweise niedrigste KK berechnet. Aus dieser Beobachtung ergibt sich ein weiterer Hinweis auf die Notwendigkeit, bei künftigen Untersuchungen an pathologischen Sprechern Gruppen von männlichen und weiblichen Sprechern getrennt zu untersuchen. Dies gilt besonders dann, wenn das Ziel in der Entwicklung akustischer Normwerte zur Beschreibung der Qualität der Stimme besteht.



LPC-ERROR-SIGNAL

Abb. 3.4.q Die Tendenz des LES (Integral über die sich bei der linearen Prädiktion ergebenden "Error-Funktion")

Der LES ergibt sich durch die Aufsummierung der Beträge des LPC-Error-Signals, das bei jeder Aufnahmesitzung berechnet wird. Der LES zeigt die erwartete abnehmende Tendenz bei den Versuchspersonen 1, 3 und 5 und zeigt bei diesen Versuchspersonen die Abnahme von Geräuschanteilen und die zunehmende Periodizität des Signals an. Besonders hinzuweisen ist auf die Entwicklung des LES bei der Versuchsperson 4, bei der die Tendenz der besseren Periodizität des Signals durch den KK nicht so gut erfaßt wurde wie durch den LES. Bei der Versuchsperson 6 nimmt der LES erst ab und dann wieder zu, seine Werte sind allerdings insgesamt sehr niedrig. Bei dieser Versuchsperson ergaben sich für alle Parameter, bei denen die Periodizität des Signals bestimmt wurde, im Vergleich zu den übrigen Versuchspersonen gute Werte. Bei der Versuchsperson 5 steigt der LES an. Da bei dieser Versuchsperson nach der Entwicklung der übrigen Werte die

Periodizität der Grundschiwingung zunahm, ist anzunehmen, daß der Grund für diese Tendenz in der Zunahme hochfrequenter Geräuschkomponenten liegt, die sich deutlich in der Entwicklung des RMN zeigt. Diese Beziehung gilt allerdings nicht für die Versuchsperson 3, bei der der RMN eine stark abnehmende Tendenz aufweist, der LES dagegen ansteigt und eine dem Verlauf des KK vergleichbare Entwicklung nimmt. Die Werte, die in der vorliegenden Untersuchung für den LES berechnet wurden, bestätigen Koike und Märkel (1973) und Davis (1976b) darin, daß sich das LPC-"Error-Signal" zur akustischen Untersuchung an pathologischen Stimmen eignet. Allerdings weist die Entwicklung des LES bei den Versuchspersonen 3 und 5 darauf hin, daß seine Verwendung noch weiter getestet werden sollte.

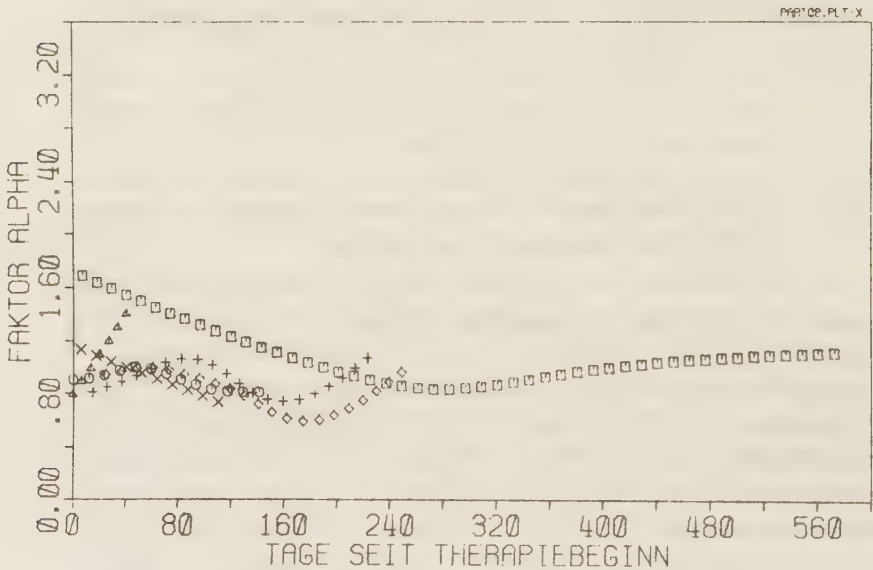


Abb. 3.4.r Die Tendenz des Faktors ALPHA (Verhältnis zwischen der Intensität oberhalb 1000 Hz und der Intensität unterhalb 1000 Hz.)

Zur Berechnung des ALPHA-Parameters wird mit Hilfe einer Fast-Fourrier-Transformation das Spektrum des Sprachschalls "pitch-synchron" bestimmt und die Werte werden für jede Aufnahmesitzung zu einem gemittelten Spektrum zusammengefaßt. ALPHA ergibt sich danach aus dem Verhältnis zwischen der spektralen Energie oberhalb 1000 Hz und der spektralen Energie unterhalb 1000 Hz. Die Entwicklung des Faktors ALPHA soll im folgenden im Zusammenhang mit den Darstellungen der linearen spektralen Tendenz (Abb. 3.4.s bis 3.4.x) betrachtet werden. Zur Veranschaulichung der spektralen Veränderungen, die im Faktor ALPHA und der LST zum Ausdruck kommen, wurde der dreidimensionale Plott angefertigt (Abb. 3.4.y). In ihm sind die spektralen Veränderungen, die bei der Versuchsperson 1 im Lauf der Zeit eintraten, dargestellt. Bei den Versuchspersonen 1, 2 und 5 nimmt der ALPHA-Parameter ab. Die Abbildungen des LST zeigen bei diesen Versuchspersonen dementsprechend eine Zunahme der Energie unterhalb der 1000-Hz-Grenze, und insbesondere bei der Versuchsperson 1 eine Abnahme der Energie im Bandbereich um 3200 Hz, durch die eine Reduktion der Rauschkomponenten in diesem Bereich dokumentiert wird. Bei der Versuchsperson 3 nimmt ALPHA zu. Nach dem LST ist diese Entwicklung auf die Reduktion der Energie unterhalb 1000 Hz zurückzuführen, der ein leichter Anstieg der Energie oberhalb 1000 Hz gegenübersteht. Nach Frødkjaer-Jensen und Prytz (1976) ist die Entwicklung von ALPHA bei der Versuchsperson 1 sehr häufig bei Patienten mit Stimmlippenlähmungen, der bei den Versuchspersonen 1, 2 und 5 festgestellte Abfall hingegen seltener. Anhand der kleinen Zahl von Fällen, die in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden, kann über die Häufigkeit von Typen der spektralen Tendenz keine Aussage gemacht werden.

Die Tendenz des Faktors ALPHA bei den Versuchspersonen 4 und 6 ist nicht gradlinig wie bei den übrigen Versuchspersonen. Bei gleichbleibenden Aufnahmebedingungen können Artefakte für diese Entwicklung nicht verantwortlich gemacht werden. Eine mögliche Begründung für die Tendenz von ALPHA bei diesen Versuchspersonen kann in den im LST dargestellten spektralen Energieverschiebungen bei diesen beiden Versuchspersonen gesehen werden: bei beiden wurden unterhalb der 1000 Hz-Grenze sowohl Energiezunahmen als auch Energieabnahmen während der Therapie festge-

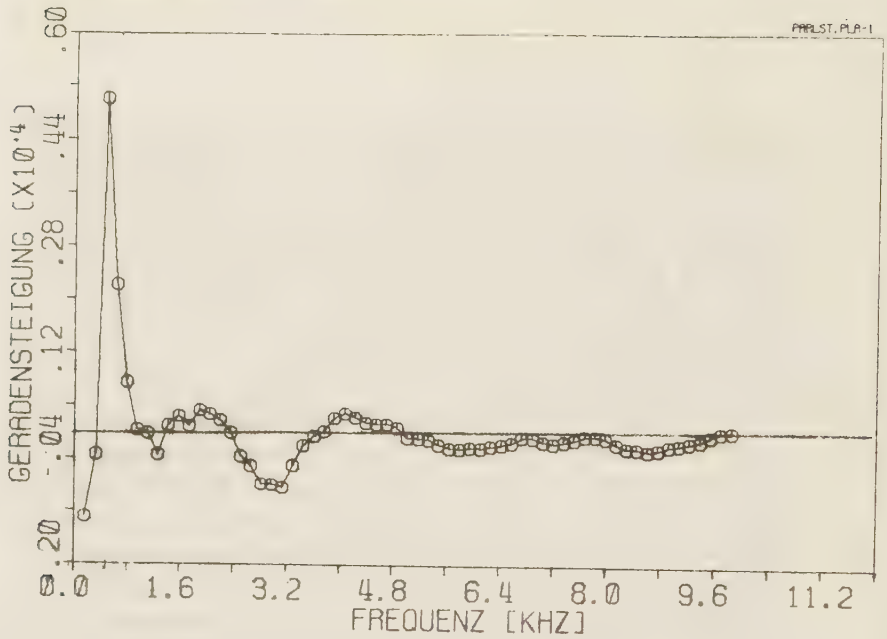
stellt. Der linearen spektralen Tendenz liegt eine Gradenanpassung zugrunde, durch die spektrale Veränderungen zwar gut erfaßt werden, in der die durchaus möglichen nicht-linearen Verläufe in der spektralen Veränderung aber nicht zum Ausdruck kommen. Es ist anzunehmen, daß bei den Versuchspersonen 4 und 6 die Zu- und Abnahmen der Energie unterhalb 1000 Hz in keinem indirekt proportionalen Verhältnis standen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Wichtungen für den Bereich unterhalb 1000 Hz, durch die Änderungen des Faktors ALPHA im Therapieverlauf erklärt werden könnten. Natürlich muß diese Annahme in weiteren Untersuchungen überprüft werden.

Zum Faktor ALPHA ist schließlich zu sagen, daß er, wie erwartet, inter-individuelle Verläufe der Therapie wiedergibt. Spektrale Veränderungen, die sich in den Werten für ALPHA niederschlagen, konnten in der vorliegenden Untersuchung mit Hilfe der Darstellung der linearen spektralen Tendenz nachvollzogen werden. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß bei den hier analysierten pathologischen Stimmen unterhalb der für die Berechnung von ALPHA maßgeblichen Grenze große spektrale Veränderungen registriert wurden. Dies betrifft sowohl die beiden Versuchspersonen, bei denen unterhalb dieser Grenze sowohl Zu- als auch Abnahmen spektraler Energie festgestellt wurden - wobei die Abnahme zwischen 200 und 400 und die Zunahme zwischen 600 und 1000 Hz zu verzeichnen war - als auch die übrigen Versuchspersonen, bei denen zwischen 200 und 400 Hz starke Zunahmen an spektraler Energie im Verlauf der Therapie zu verzeichnen sind (Versuchspersonen 1, 2 und 5) aber auch Abnahmen in diesem Bereich (Versuchsperson 3). Aus diesen Werten kann die Hypothese abgeleitet werden, daß eine 1000-Hz-Grenze zur Kennzeichnung spektraler Veränderungen durch einen Koeffizienten nicht so gut geeignet ist, wie eine im Frequenzbereich tieferliegende Grenze. Zumindest bei den hier analysierten Patienten hat sich eine große Bedeutung für den Bereich zwischen 200 und 600 Hz herausgestellt, in dem positive und negative spektrale Energieveränderungen zu verzeichnen sind. Eine nähere Untersuchung dieses spektralen Bereiches und auch eine Überprüfung von Koeffizienten, die durch andere Grenzen definiert sind als der Faktor ALPHA erscheint daher vielversprechend.

Zu der Entwicklung innerhalb des Spektrums im Verlauf einer Stimmtherapie, die in den Darstellungen des LST zum Ausdruck kamen, kann noch eine weitere Anmerkung gemacht werden: Bei den Versuchspersonen 3, 4 und 6 nimmt die Energie im Bereich zwischen 200 und 400 Hz im Verlauf der Therapie stark ab, und auch bei der Versuchsperson 1 ist eine, wenn auch relativ leichtere Abnahme der Energie in diesem Bereich zu verzeichnen. In den Bereich zwischen 200 und 400 Hz fallen im Deutschen die ersten Formanten der mit hoher Zungenposition artikulierten Vokale. Nach Yanagihara (1967) ist hochgradige Heiserkeit im "Sonagramm" durch Maskierung der unteren Formantbereiche durch Rauschen gekennzeichnet. Nessel (1960) gibt an, daß [u], [e] und [i] von pathologischen Sprechern am wenigsten "klar" artikuliert werden können. Einige der hier untersuchten Versuchspersonen gaben an, daß es ihnen schwerfällt, [u] oder [i] zu produzieren. Offenbar führte die Stimmlippenlähmung bei vier der Patienten zu einer Zunahme an Geräuschanteilen gerade in diesem niederfrequenten Bereich, die im Verlauf der Therapie zugunsten der harmonischen Komponenten abnahmen. Daraus kann ein weiterer Schluß auf die Bedeutung gerade dieses spektralen Bereiches für die Beurteilung der Stimmqualität gezogen werden.

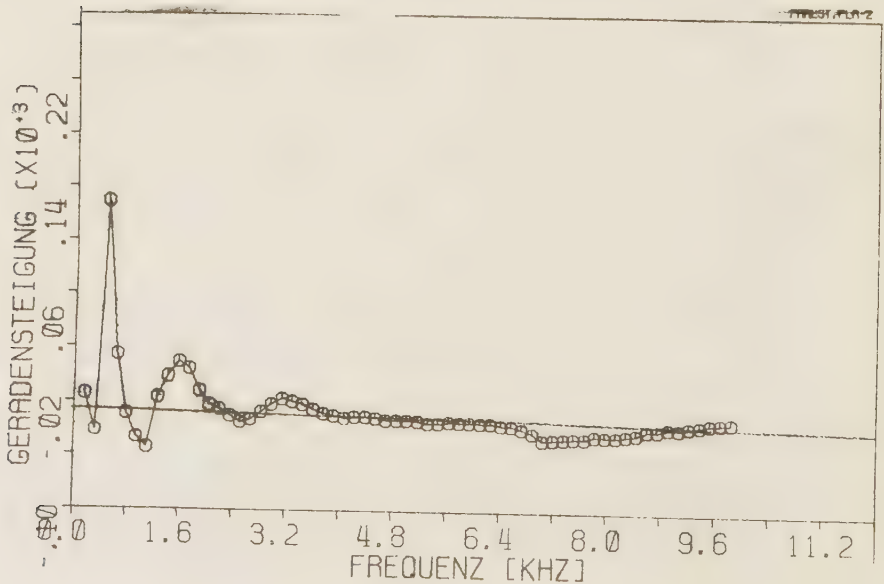
Abb. 3.4.s bis 3.4.x

Die lineare spektrale Tendenz (LST)



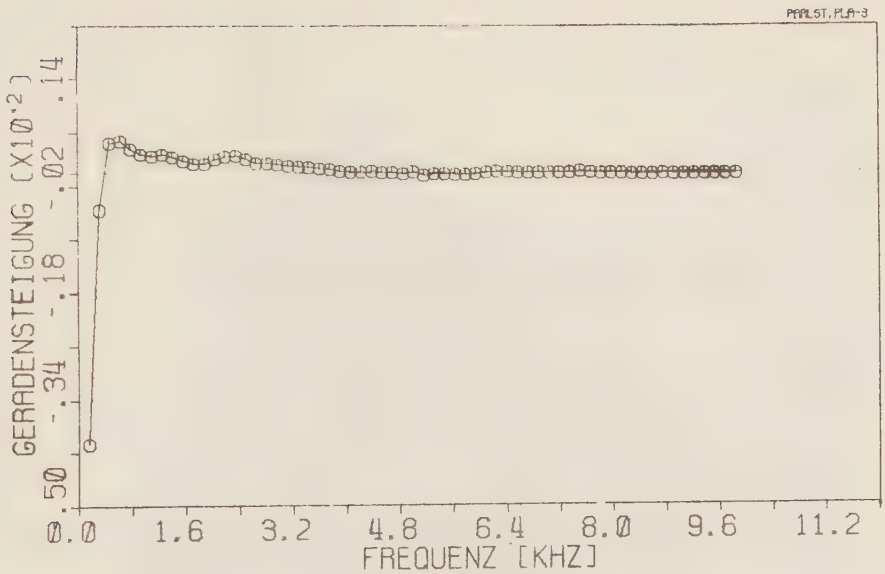
3.4.s

LINEARE SPEKTRALE TENDENZ Versuchsperson 1

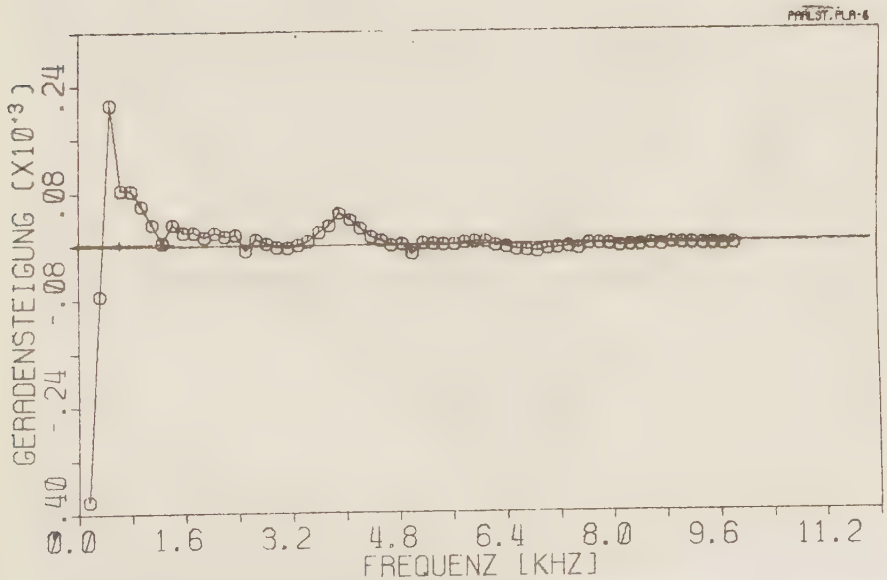


3.4.t

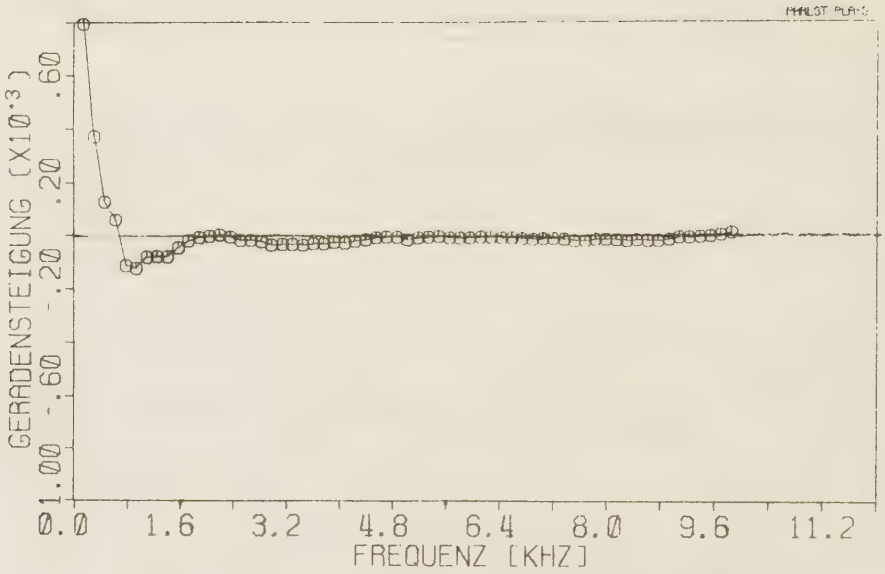
LINEARE SPEKTRALE TENDENZ Versuchsperson 2



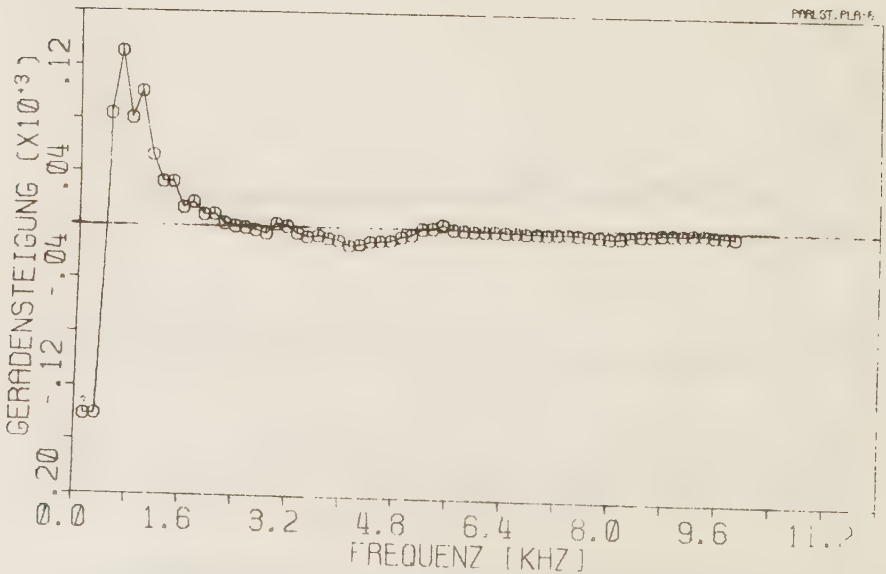
3.4.u LINEARE SPEKTRALE TENDENZ Versuchsperson 3



3.4.v LINEARE SPEKTRALE TENDENZ Versuchsperson 4



3.4.w LINEARE SPEKTRALE TENDENZ Versuchsperson 5



3.4.x LINEARE SPEKTRALE TENDENZ Versuchsperson 6

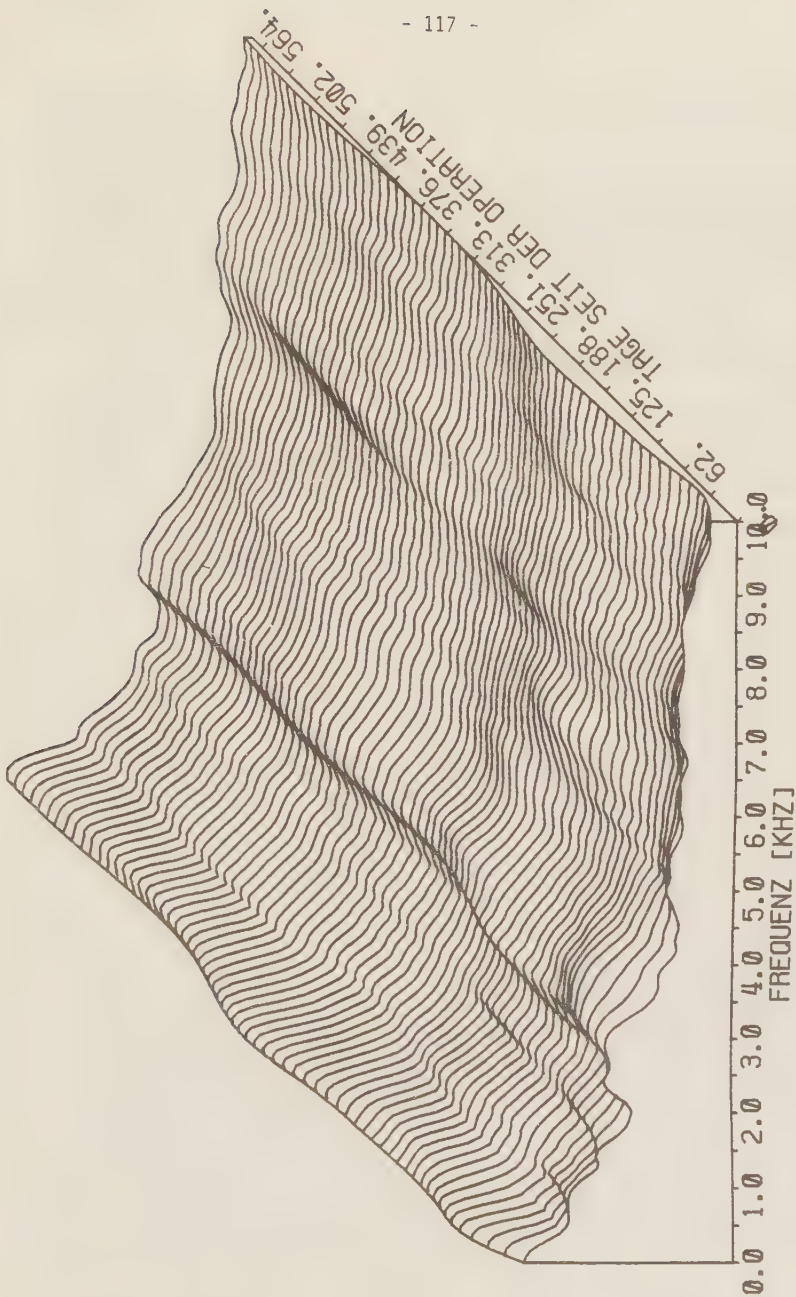


Abb. 3.4.y Drei-D-Plott zur Veranschaulichung der Veränderungen spektraler Energie für die Versuchsperson 1

3.5 Zusammenfassung

Gegenstand des dritten Kapitels waren die eigene experimentelle Untersuchung und deren Ergebnisse. Die Stimmen von sechs Patienten, die im Verlauf der Stimmtherapie auf einem Tonbandgerät aufgezeichnet worden waren, wurden mit Hilfe von verschiedenen akustischen Verfahren analysiert. Die Resultate der akustischen Analyse wurden im Zusammenhang mit den laryngoskopischen Befunden und einer auditiven Beurteilung der Stimmen diskutiert.

Über die zu erwartende Richtung, in der sich die akustischen Meßwerte bei stimmtherapeutischem Erfolg verändern sollten, konnten bei sechs Parametern Vorannahmen gemacht werden, bei dreien wurden interindividuelle Differenzen in der Entwicklung erwartet. Bei den Parametern, über deren Tendenz Vorannahmen gemacht werden konnten, zeigte sich erwartungsgemäß eine Abnahme des AP bei allen Patienten im Verlauf der Stimmtherapie. Die Parameter RMN, ASS und PP zeigten bei vier der sechs Versuchspersonen die erwartete Tendenz, der KK und der LES bei dreien. Bei der Versuchsperson 2 entwickelten sich alle Parameter in der erwarteten Richtung, bei der Versuchsperson 1 waren es fünf und bei den Versuchspersonen 4 und 5 je vier der Parameter, die eine erwartungsgemäße Entwicklung nahmen. Bei den Versuchspersonen 3 und 6 zeigten drei bzw. zwei der Parameter den Erfolg der Stimmtherapie an. Über die absoluten Werte, die für die einzelnen Parameter berechnet wurden kann anhand der vorliegenden Arbeit keine Aussage gemacht werden. Hierzu sind statistische Untersuchungen an größeren Datenmengen erforderlich. Auf die Eignung der Verfahren zur Beurteilung von Therapieverläufen weist neben den Fällen, in denen die erwartete Tendenz der Parameter bestätigt werden konnte, die Tatsache hin, daß in einigen Fällen ein Zusammenhang zwischen Behandlungsdauer und Geschwindigkeit des Therapieerfolgs aus der Parameterentwicklung erkennbar wird: Die Kurven bei der Versuchsperson 1, bei der die Behandlung am längsten dauerte, verlaufen relativ flach, während bei der Versuchsperson 3, die nur sehr kurz behandelt zu werden brauchte, vor allem der RMN und der AP sehr steil nach unten verlaufen.

Bezüglich der Parameter, über deren Tendenz keine Vorannahmen gemacht werden konnten, zeigte sich für die Grundfrequenz bei den beiden Fällen mit Intermediärstellung ein Abnahme des MGF und bei den Fällen mit Paramedianstellung je zweimal eine Abnahme und eine Zunahme. Der Faktor nahm in einem Fall ab und in drei Fällen zu, zweimal verlief er nicht gradlinig. Durch die lineare spek-

trale Tendenz wurden die Energieveränderungen im Einzelnen sichtbar gemacht. Über die endgültige Eignung der einzelnen Parameter kann anhand der vorliegenden Pilotstudie, deren Ziel es war, Verfahren der digitalen Signalverarbeitung zur Beurteilung stimmtherapeutischer Erfolge anzuwenden und diskutierbar zu machen, keine Aussage gemacht werden. Die Ergebnisse weisen jedoch in vielen Fällen auf die Möglichkeit einer solchen Anwendung hin. Allerdings bestätigt die Tatsache, daß nicht alle Parameter sich bei allen Versuchspersonen erwartungsgemäß entwickeln, die Notwendigkeit, zur Stimmbeurteilung ein differenziertes System von akustischen Verfahren einzusetzen, in dem die verschiedenen Erscheinungsformen pathologischer Stimmlippenvibrationen erfaßt werden, um aus dem Gesamtbild der Entwicklung Schlüsse auf den Therapieerfolg ziehen zu können.

Zur auditiven Beurteilung, die hier in erster Linie zu Zweck der Kontrolle darüber eingesetzt wurde, daß sich die Stimmen der Patienten auch hörbar verbesserten, soll noch angemerkt werden, daß sich in der Mehrzahl der Fälle eine Übereinstimmung zwischen der auditiven Wahrnehmung der Stimme als "breathy" und dem RMN ergab, während die Bewertung der Stimmen mit "creaky" in den Parametern AP oder PP zum Ausdruck kam. In zwei Fällen konnte, anders als aus den akustischen Parametern erkennbar, keine abnehmende Tendenz von "breathyness" bzw. "creakyness" festgestellt werden. Es ist anzunehmen, daß hierbei die akustischen Verfahren objektiver gearbeitet haben als das menschliche Ohr, weil bei der Versuchsperson 1 wegen der sehr deutlich wahrnehmbaren Verrauschtheit des Signals die zusätzlich vorhandene, aperiodische Stimmlippenschwingung nicht gehört wurde. Bei der Versuchsperson 4 dagegen war der Eindruck der unregelmäßigen Stimmlippenschwingungen so groß, daß die im RMN dokumentierten Rauschkomponenten nicht wahrgenommen wurden. Die Ergebnisse der auditiven Beurteilung insgesamt stimmen jedoch mit den in den akustischen Parametern erwiesenen Tendenzen gut überein. Für die Zukunft ist der Vorschlag zu machen, daß die Beziehung zwischen den Termini, mit denen die Wahrnehmung pathologischer Stimmen bezeichnet wird, und den akustischen Eigenschaften des Sprachsignals noch viel genauer geklärt wird. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn ein System von akustischen Verfahren eine verbreitete Anwendung in der Diagnostik finden soll.

4. Schluß

Der Gegenstand der vorliegenden signalphonetischen Untersuchung war das pathologisch veränderte Oberflächenverhalten der an der Phonation beteiligten Organe. Es äußert sich im akustischen Sprachsignal durch die Aperiodizität der Grundschwingung, durch die Reduktion der harmonischen Energie und die Er-

höhung von Rauschkomponenten im Spektrum. Der Einsatz digitaler Methoden der Signalverarbeitung ermöglichte die automatische Bewertung der Stimme im Therapieverlauf durch akustische Parameter. Es hat sich dabei gezeigt, daß die Rehabilitation der Stimme im Verlauf der Therapie mit Hilfe dieser Parameter erfaßt werden kann.

Aus den Resultaten der vorliegenden Untersuchung ergeben sich die folgenden Perspektiven für die weitere Arbeit auf dem Gebiet der Signalphonetik und der Anwendung ihrer Methoden im Bereich der Stimmpathologie: Ein akustisches Verfahren, das zum Zweck der Beurteilung der Stimme eingesetzt werden soll, sollte, wie es in der vorliegenden Untersuchung der Fall war, aus einem System von Einzelverfahren bestehen, die die verschiedenen Erscheinungsformen pathologischer Stimmlippenschwingung differenziert erfassen. Zur Optimierung eines solchen Systems sollten in zukünftigen Untersuchungen sowohl die physiologischen als auch die perzeptiven Korrelate der akustischen Parameter noch weiter erarbeitet werden.

Gemäß dem Fernziel, das der vorliegenden Untersuchung zugrunde liegt und das darin besteht, akustische Verfahren zur objektiven Stimmdiagnostik einzusetzen, sollten an weiteren und größeren Gruppen von Patienten mit Hilfe von geeigneten statistischen Methoden Normwerte für die Parameter erarbeitet werden, anhand derer einerseits gesunde und kranke Stimmen voneinander unterschieden werden können und andererseits verschiedene Stufen des Schweregrads von Stimmstörungen differenziert werden können, so daß Therapieerfolge noch besser erfaßt werden, als es in der vorliegenden Untersuchung der Fall war. Weiter ist an eine mögliche Differentialdiagnose mit Hilfe eines Systems von akustischen Verfahren zu denken, wozu sich als nächstliegender Schritt die Anwendung der hier eingesetzten Methoden auf andere stimmpathologische Erscheinungen als die Stimmlippenlähmung anbietet.

Aus den hier vorgelegten Untersuchungsergebnissen und aus den eben geschilderten Anregungen ergeben sich klare Hinweise auf die Möglichkeiten des Einsatzes signalphonetischer Methoden in der Zukunft.

BIBLIOGRAPHIE

- Arnold, G.E. (1961) Physiology and pathology of the cricothyroid muscle. Laryngoscope 71: 687-753
- Arnold, G.E. (1963) Wiederherstellung der Stimme nach Rekurrenslähmung durch intracordale Injektion. Z. Ohrenheilk. 97: 94-100
- Baken, R.J., Isshiki, N. (1977) Arytaenoid displacement by simulated intrinsic muscle contraction. Folia phoniat. 29: 206-219
- Benguereel, A.P., Hirose, H., Sawashima, M. (1978) Laryngeal control in french stop production. Folia phoniat. 30: 175-198
- Benninghoff, A., Goerttler, K. (1964) Lehrbuch der Anatomie des Menschen. Bd. 2: Eingeweide. 7. verb. Auflage. München: Urban und Schwarzenberg
- Benninghoff, A., Goerttler, K. (1967) Lehrbuch der Anatomie des Menschen. Bd. 3: Nervensystem, Haut- und Sinnesorgane. 8. verb. Auflage. München: Urban und Schwarzenberg
- Berg, Jw. van den (1954) Sur les théories myo-élastique et neurochronaxique de la phonation. Rev. Laryng. Bordeaux 74: 494-512
- Berg, Jw. van den (1955) On the role of the laryngeal ventricle in voice production. Folia phoniat. 7: 57-69
- Berg, Jw. van den (1958) Myoelastic-aerodynamic theory of voice production. J. Speech Hear. Res. 1: 227-244
- Berg, Jw. van den (1962) Modern research in experimental phoniatrics. Folia phoniat. 14: 81-149
- Berg, Jw. van den, Moll, J. (1955) Zur Anatomie des menschlichen Musculus vocalis. Z. Anat. Entwicklung 118: 465-470
- Berg, Jw. van den, Zanatema, J.T., Dornenbaal, Jr. P. (1957) On the air-resistance and the bernoulli - effect of the human larynx. J. Acoust. Soc. Am. 29: 626-631
- Böhme, G. (1965) Die Wirksamkeit der Elektrotherapie bei Kehlkopferkrankungen im stroboskopischen Bild. Z. Laryng. Rhinol. Otol. 44: 481-488
- Böhme, G. (1974) Stimm-, Sprech- und Sprachstörungen. Stuttgart: Fischer
- Böhme, G., Schmutzler, W. (1966) Stimmlippenlähmungen und Larynxotomographie. Z. Laryng. Rhinol. Otol. 45: 6-21
- Boenninghaus, H.G. (1972) Hals- Nasen- Ohrenheilkunde. Berlin: Springer

- Bowler, N.W. (1974) A fundamental frequency analysis of harsh voice quality. *Speech Monog.* 31: 128-134
- Broad, D.J. (1973) Phonation. In: Minifie, F.D., Hixon, T.J. Williams, F. (eds.) *Normal aspects of speech, hearing and language*: 127-168. New Jersey: Prentice Hall
- Brodnitz, F.S. (1966) Rehabilitation of the human voice. *Bull. NY. Acad. Med.* 42: 231-240
- Childers, D.G., Paige, A., Moore, G.P. (1976) Laryngeal vibration patterns. Machine - aided measurements from high-speed film. *Arch. Otolaryngol.* 102: 407-410
- Clerf, L.H. (1953) Paralysis of the larynx. *Acta otolaryngologica* (Stockh.) 43: 108-111
- Coleman, R. (1976) A comparison of the contribution of two voice quality characteristics to the perception of maleness and femaleness in the voice. *J. Speech Hear. Res.* 19: 168-180
- Cook, W.R. (1970) A comparison of idiopathic laryngeal paralysis in man and hoarse. *J. Laryng.* 84: 819-835
- Cornut, G., Pierucci, B. (1968) Contribution à l'étude de la paralysie récurrentielle du point de vue phoniatrice. *J.f.ORL* 8: 665-672
- Cornut, G. (1971) Vibrations normales et pathologiques des cordes vocales étudiées à l'aide du sonagraphe. *Folia phoniat.* 23: 234-238
- Daniloff, R.G. (1973) Normal articulation processes. In: Minifie, F.D., Hixon, T.J., Williams, F. (eds.) *Normal aspects in speech, hearing and language*: 169-210. New Jersey: Prentice Hall
- Davis, S.B. (1975) Preliminary results using inverse filtering of speech for automatic evaluation of laryngeal pathology. *J.Acoustic. Soc. Am.* 58: S 111 (A)
- Davis, S.B. (1976a) Determination of glottal area based on digital image processing of high-speed motion pictures of the vocal folds. *J. Acoust. Soc. Am.* 60: S 65 (A)
- Davis, S.B. (1976b) Computer evaluation of laryngeal pathology based on inverse filtering of speech. Ph.D. Diss. University of Calif. und: SRCL Monograph 13. Speech Com. Res. Lab. Inc. Sta. Barbara
- Davis, S.B. (1978) Acoustic characteristics of normal and pathological voices. *St. rep. Speech Res.* 54: 133-164

- Deneke, H.J. (1964) Stimmverbesserung bei einseitiger Rekurrenslähmung mit larynx-eigener Methode. *Z.Laryng. Rhinol. Otol.* 43: 221-225
- Dunker, E. (1969) Neuere Ergebnisse der Kehlkopfphysiologie. *Folia phoniat.* 21: 161-178
- Dunker, E., Schlosshauer, B. (1960) Stimmlippenschwingungen bei Stimmstörungen. Schwarz-Weiß Film
- Ellis, P.D., Pallister, W.K. (1975) Recurrent nerve palsy and endotracheal intubation. *J. Laryngol. Otol.* 89: 823-826
- Ewan, W.G. (1977) Can the intrinsic Fo differences between vowels be explained by source - tract coupling? *St. Rep. Speech Res.* 51-52: 197-199
- Faaborg-Andersen, K. (1957) Electromyographic investigations of the intrinsic laryngeal muscles in man. *Acta physiol. scand.* 41: Suppl. 140
- Faaborg-Andersen, K. (1965) Electromyography of laryngeal muscles in humans: technics and results. In : Trojan, F. (Hrsg.) *Aktuelle Probleme der Phoniatrie und Logopädie*. Basel: Karger
- Faaborg-Andersen, K., Vennard, W. (1964) Electromyography of extrinsic laryngeal muscles during phonation of different vowels. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 73: 248-254
- Fant, G. (1960) Acoustic theory of speech production. S'Gravenhage: Mouton
- Fant, G. (1977) Laryngeal mechanisms and features. *Proc. disc.sem., 8th int. congr. phon. sc., Leeds 1975. Phonetica* 34: 252-255
- Farnsworth, D.W. (1940) High speed motion pictures of the human vocal cords. *Bell Lab. Rec* 18: 203-208
- Fernau-Horn, H. (1954) Zur Übungsbehandlung funktioneller Stimmstörungen. *Folia phoniat.* 6: 239-245
- Fex, S. (1970) Judging the movement of the vocal cords in laryngeal paralysis. *Acta otolaryngol. Suppl.* 263
- Firth, J.R. (1969) Phonological features of some indian languages. In: Firth, J.R. *Papers in linguistics*: 47-53. 5.Auflage, Oxford: University press
- Fisher, W.M., Monsen, R.B., Engebretson, A.M. (1975) Variations in the normal glottal wave. *J. Acoust. soc. Am.* 58: S 41 (A)

- Flanagan, J.F. (1958) Some properties of the glottal sound source. J. Speech Hear. Res. 1: 99-116
- Flanagan, J.F. (1972) Speech analysis, synthesis and perception. 2.verb. Auflage. Berlin: Springer
- Flanagan, J.L., Isshizaka, K. (1978) Computer model to characterize the air-colume displaced by the vibrating vocal cords. J. Acoust. Soc. Am. 65: 1559-1565
- Frank, F. (1971) Objektive Stimmbeurteilung idiopathischer Rekurrensparesen vor und nach der Rehabilitation. Mschr. Ohrenheilk. 105: 418-424
- Fritzzell, B., Hammarberg, B. Wedin, L. (1977) Clinical applications of acoustical voice analysis. Pt 1: Background and perceptual features. Speech Transm. Lab. - QPSR 2-3: 31-38.
- Frøkjær-Jensen, B. und Prytz, S. (1974) Evaluation of speech disorders by means of long-time-average-spectra. ARIPUC 8: 227-237
- Frøkjær-Jensen, B. und Prytz, S. (1976) Registration of voice quality. Technical review 3: 3-17
- Fröschels, E. (1932) Ober eine neue Behandlungsmethode der Stimmstörungen bei einseitiger Rekurrensparese. Mschr. Ohrenheilk. 66: 1316-1320
- Fröschels, E. (1935) Eine neue Behandlungsmethode der Lähmungserscheinungen der Stimmlippen und der Atembeschwerden bei doppelseitiger Rekurrenslähmung. Mschr. Ohrenheilk. 69: 641-647
- Fröschels, E. (1952) Chewing method as a therapy. Arch. Otolaryng. 65: 427-434
- Fujimura, O. (1962) Analysis of nasal consonants. J. Acoust. Soc. Am. 34: 1865-1875
- Fujimura, O. (1977) Control of the larynx in speech. Proc. disc. sem., 8th int. Congr. phon. scs., Leeds 1975. Phonetica 34: 280-288
- Full-Scharrer, G. (1974) Phoniatische Möglichkeiten bei Stimmbandlähmungen. Z. Laryng. Rhinol. Otol. 53: 585-590
- Gabriel, P., Chilla, R. (1975) Über Indikation und Zeitpunkt konservativer und chirurgischer Therapie peripherer neurogener Stimmbandlähmungen. HNO 23: 333-336
- Gabriel, P., Chilla, R. (1978) Dysphonie nach Strumektomie, Kehlkopf und Stimmveränderungen nach Schilddrüsenoperationen. Chirurg 49: 576-579

- Gandour, J.T. (1975) The features of the larynx:n-ary or binary?
Phonetica 32: 241-253
- Gandour, J.T., Maddieson, I. (1976) Measuring larynx movement in
standard thai using the cricothyrometer. Phonetica 33:
241-267
- Garcia, M.J. (1855) Observations on the human voice. The philosophical
magazine 9: 218 ff.
- Gauffin, J., Sundberg, J. (1977) Clinical applications of acoustic voice
analysis. Pt. 2: Acoustic analysis, results and discussion.
Speech Trans. Lab. QPSR 2-3: 39-43
- Gerull, G., Giesen, M., Hippel, K., Mrowinski, D., Schweers, H. (1977)
Untersuchung verschiedener Gruppen von Stimmstörungen durch
statistische Spektralanalyse. HNO 25: 14-22
- Goerttler, K. (1950) Die Anordnung, Histologie und Histogenese der quer-
gestreiften Muskulatur im menschlichen Stimmband. Z. Anat.
Entwicklungsgesch. 115: 352-401
- Gordon, M.T., Morton, F.M., Simpson, I.C. (1978) Air flow measurements
in diagnosis assessment and treatment of mechanical dysphonia.
Folia phoniat. 30: 1161-174
- Gould, W.J. (1975) Quantitative assessment of voice function in micro-
laryngology. Folia phoniat. 27: 190-215
- Haglund, S., Knutson, E., Mortenson, A. (1973) Electromyography
in motor disorders of the larynx. Acta otolaryngol. 75:
366-367
- Hardcastle, F.J. (1976) Physiology of speech production. London:
Academy press
- Harden, J. (1975) Comparison of the glottal area changes as measured
from ultra-high speed photographs and photoelectric
glottographs. J. Speech Hear. Dis. 18: 728-738
- Harris, K., Gay, T., Lieberman, P., Scholes, G. (1969) The function of
the muscles in control of stress and intonation. St. rep.
speech res. 19-20: 127-138
- Harris K. (1974) Physiological aspects of articulatory behaviour.
In: Seboek, T.A. (ed.) Current trends in linguistics, vol.
12: 2281-2302. The Hague: Mouton
- Hecker, M.H., Kreul, E.J. (1971) Description of the speech of patients
with cancer of the vocal folds. J. Acoust. Soc. Am. 49:
1275-1282

- Heinz, J.M. (1974) Speech acoustics. In: Seboek, T.A. (ed.) Current trends in linguistics, vol. 12: 2241-2280. The Hague: Mouton
- Hiki, S., Imaizumi, S., Hirano, M., Matsushita, H., Kakita, Y. (1975) Acoustical analysis for voice disorders. J. Acoust. Soc. Am. 58: S 111 (A)
- Hirano, M. (1974) Morphological structure of the vocal cord as a vibrator and its variations. Folia phoniat. 26: 89-94
- Hirano, M. (1976) Clinical Examination for voice disorders in recurrent laryngeal nerve palsy. In: Loebell, E. (ed.) 16th international congr. Logop. Phoniat. Interlaken 1974: Basel: Karger
- Hirano, M., Vennard, W., Ohala, J. (1970) Regulation of register, pitch, and intensity of voice. Folia phoniat. 22: 1-22
- Hirose, H. (1975) The posterior cricoarytaenoid as a speech muscle. Ann. Bull. RILP. 9: 47-66
- Hirose, H. (1976) The posterior cricoarytaenoid as a speech muscle. Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. 85: 335-342
- Hirose, H. (1977a) Laryngeal adjustments in consonant production. Proc. disc. sem. 8th int. congr. phon. scs. Leeds 1975 Phonetica 34: 289-259
- Hirose, H. (1977b) Clinical observations on 600 cases of recurrent laryngeal nerve palsy. Ann. Bull. RILP. 11: 165-173
- Hirose, H., Gay, T. (1972) The activity of the intrinsic laryngeal muscles in voicing control. Phonetica 25: 140-164
- Hirose, H., Ushijama, T. (1978) Laryngeal control for voicing distinction in Japanese consonant production. Phonetica 35: 1-10
- Hiroto, I. (1976) Vocal cord paralysis. In: Loebell, E. (ed. 16th int. congr. logop. phoniat. Interlaken 1974: 168 Basel: Karger
- Hiroto, I., Hirano, M., Toyozumi, Y., Shin, T. (1967) Electromyographic investigations of the intrinsic laryngeal muscles related to speech sounds. Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. 76: 861-872
- Hiroto, I., Buma, S. (1976) Is the vocal cord truly immovable in the recurrent laryngeal nerve paralysis? In: Loebell, E. (ed.) 16th int. congr. logop. phoniat. Interlaken 1974, 169-170 Basel: Karger

- Hixon, T.J. (1973) Respiratory function in speech. In: Minifie, F.D., Hixon, T.J., Williams, F. Normal aspects of speech, hearing, and language: 73-127. New Jersey: Prentice Hall
- Hofer, G. (1953) Untersuchungen bei Lähmungen der motorischen Kehlkopfnerven. Acta. otolaryngol. 43: 100-107
- Hollien, H. (1960) Vocal pitch variation related to change in vocal fold length. J. Speech. Hear. Res. 3: 150-156
- Hollien, H. (1962) Vocal fold thickness and fundamental frequency of phonation. J. Speech Hear. Res. 5: 237-243
- Hollien, H., Moore, G.P. (1960) Measurements of the vocal folds during changes in pitch. J. Speech Hear. Res. 3: 157-165
- Hollien, H., Moore, G.P., Wendahl, R., Michel, J. (1966) On the nature of vocal fry. J. Speech Hear. Res. 9: 345-347
- Hollien, H., Colton, R.H. (1969) Four laminagraphic studies of vocal fold thickness. Folia phoniat. 21: 179-198
- Hollien, H., Damsté, H., Murry, T. (1969) Vocal fold length during vocal fry phonation. Folia phoniat. 21: 257-265
- Hollien, H., Dew, D., Philips, P. (1971) Phonation frequency ranges of adults. J. Speech Hear. Res. 755-760
- Hollien, H., Gould, W.J., Johnson, B. (1976) A two-level concept of vocal registers. In Loebell, E. (ed.) 16th int. congr. logop. phoniat. Interlaken 1974: 188-194 Basel: Karger
- Hollien, H., Girard, G.T., Coleman, R.F. (1977) Vocal fold vibratory patterns of pulse register phonation. Folia phoniat. 29: 200-205
- Holmes, J.N. (1962) An investigation of the volume velocity wave form at the larynx during speech by means of an inverse filter. Proc. 4th int. congr. acoust. 1962, Copenhagen
- Holmes, J.N. (1977) The acoustic consequences of vocal cord action. Proc. 8th int. congr. phon. scs. Leeds 1975. Phonetica 34: 316-317
- Husson, R. (1953) Sur le reflexe cochleo-récurentiel. Folia phoniat. 5: 127-128
- Husson, R. (1966) Über einige neuere Ergebnisse der Kehlkopfphysiologie und Pathologie. Arch. Ohr.-Nas.-Kehlk.-Heilk. 169: 176-182
- Husson, R. (1959) Der gegenwärtige Stand der physiologischen Phonetik. Phonetika 4: 1-32

- Imaizumi, S., Hiki, S., Hirano, M., Matsushita, H. (1978) Analysis of pathological voices with a sound spectrograph. Trans Comm. speech res., Acoust. soc. Jap. S 77-64
- Ishizaka, K., Flanagan, J.L. (1977) Acoustic properties of longitudinal displacement in vocal cord vibration. Bell syst. tech. j. 6: 889-919
- Ishizaka, K., Isshiki, N. (1975) Computer simulation of pathological vocal-cord vibration. J. Acoust. Soc. Am. 58: S 111(A)
- Ishizaka, K., Isshiki, N. (1976) Computer simulation of pathological vocal-cord vibration. J. Acoust. Soc. Am. 60: 1193-1198
- Ishizaka, K., Matsudaira, M. (1972) Fluid mechanical considerations of vocal cord vibration. SRCL Monograph 8. Speech Com. Res. Lab. Inc. Sta. Barbara
- Isshiki, N. (1964) Regulatory mechanism of voice intensity variation. J. Speech Hear. Res. 7: 17-29
- Isshiki, N. (1965) Vocal intensity and air-flow rate. Folia phoniat. 17: 92-104
- Isshiki, N., Yanagihara, N., Morimoto, M. (1966) Approach to the objective diagnosis of hoarseness. Folia phoniat. 18: 393-400
- Isshiki, N., Takeuchi, Y. (1970) Factor analysis of hoarseness. Studia phonologica 5: 37-44
- Isshiki, N., Ishikawa, T. (1976) Diagnostic value of tomography in unilateral vocal cord paralysis. Laryngoskope 86: 1673-1578
- Isshiki, N., Tanabe, M., Ishizaka, K., Broad, D. (1977) Clinical significance of asymmetrical vocal cord tension. Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. 86: 58-66
- Isshiki, N., Kitajima, K., Kojima, H., Harita, Y (1978) Turbulent noise in dysphonia. Folia phoniat. 214-224
- Iwata, S., von Leden, H. (1970a) Pitch perturbations in normal and pathological voices. Folia phoniat. 22: 413-424
- Iwata, S., von Leden, H. (1970b) Phonation quotient in patients with laryngeal diseases. Folia phoniat. 22: 116-128
- Iwata, S., von Leden, H. (1970c) Voice prints in laryngeal disease. Arch. Otolaryngol. 91: 346-351
- Jentsch, H., Sasama, R., Unger, E. (1978) Elektroglottographische Untersuchungen zur Problematik des Stimminsatzes bei zusammenhängendem Sprechen. Folia phoniat. 30: 59-66
- Jeschek, J. (1958) Über den derzeitigen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Stimmbandlähmungen. Folia phoniat. 10: 129 -149

- Johannsen, H.S., Pascher, W. (1976) Angewandte Phoniatrie IV: Stimmstörungen bei neuropsychiatrischen Krankheitsbildern und bei Lähmungen der Kehlkopfnerve. HNO 27: 20-27
- Jürgens, U., Hast, M., Pratt, R. (1978) Effects of nerve transection on squirrel monkey calls. J. comp. physiol. 123: 23-29
- Kirchner, J.A. (1977) Intrathoracic injury to the motor nerve supply of the larynx. Acta otolaryngol. 83: 163-169
- Kitzing, P., Sonesson, B. (1974) A photoelectroglottographic study of the female vocal folds during phonation. Folia phoniat. 26: 138-149
- Kitzing, P., Lofquist, A. (1977) Teflon paste injection into the paralytic vocal fold. A simple procedure to improve disturbed cough function. Scand. J. resp. dis. 56: 197-204
- Klingholz, F. (1978) Die Bewertung der Heiserkeit. Folia phoniat. 30: 257-265
- Koike, Y. (1967) Application of some acoustic measures for the evaluation of laryngeal dysfunction. J. Acoust. Soc. Am. 42: 1209 (A)
- Koike, Y. (1969) Vowel amplitude modulations in patients with laryngeal diseases. J. Acoust. Soc. Am. 45: 839-841
- Koike, Y. (1975) High speed photography of the larynx and film data processing. Can. J. Otolaryngol. 4: 800-806
- Koike, Y. (1973) Application of some acoustic measures for the evaluation of laryngeal dysfunction. Studia phonologica 7: 17-23
- Koike, Y., Hirano, M. (1973) Glottal area time function and subglottal-pressure variation. J. Acoust. soc. Am. 54: 1618-1622
- Koike, Y., Hirano, M., Morio, M. (1974) Function of the laryngeal muscles on the position and shape of the vocal cords. Folia phoniat. 26: 200 (A)
- Koike, Y., Markel, J. (1975) Application of inverse filtering for detecting laryngeal pathology. Ann. Otol. Laryngol. 84: 117-1124
- Koike, Y., Hirano, M., Morio, M. (1976) Function of the laryngeal muscles on the position and shape of the vocal cords. In: Loebell, E. (ed.) 16th congr. logop. phoniat. Interlaken 1974: 275-263 Basel: Karger
- Kressner, A. (1953) Beitrag zur Frage der Stimmbandlähmungen und zur funktionellen Anatomie des Kehlkopfes. Arch. Ohr-Nas.-Kehlk.-Heilk. 162: 479-496

- Kruse, E. (1978) Phoniatische Behandlungsmöglichkeiten bei Stimm-
lippenlähmungen in Paramedianstellung nach Strumektomie.
Z. Laryng. Rhinol. Otol. 57: 26-31
- Ladefoged, P. (1972) Elements of acoustic phonetics. Chicago:
University press
- Ladefoged, P. (1973) The features of the larynx. J. Phonetics 1: 73-83
- Lakatos, I. (1974) Über doppelseitige Stimmbandlähmungen im Gefolge der
Grippeepidemie 1969/1970. Z. Laryng. Rhinol. Otol. 53:
580-584
- Lakatos, I., von Stuckrad, H. (1975) Zur Bedeutung des m. cricothyreoideus
bei Stimmbandlähmungen. Z. Laryngol. Rhinol. Otol. 54:
452-454
- Lecluse, F.L., Brocaar, M.P., Verschuure, J. (1975) The electro-
glottography and its relation to glottal activity. Folia
phoniat. 27: 215-224
- Leden, H. v. (1961) The mechanism of phonation. Arch. Otolaryngol. 74:
660-676
- Leden, H.v., Moore, P. (1958) The larynx and voice. Physiology of the
larynx under daily stress. Ton-Farbfilm
- Leden, H.v., Moore, P., Timcke, R. (1960) Laryngeal Vibrations:
Measurements of the glottic wave. Pt III: The pathological
larynx. Arch. Otolaryngol. 71: 26-45
- Leden, H.v., Moore, P. (1961a) Vibratory pattern of the vocal cords
in unilateral vocal cord paralysis. Acta otolaringol. 53:
493-506
- Leden, H.v., Moore, P. (1961b) The mechanics of the cricoarytenoid joint.
Arch. Otolaryngol. 73: 541-550
- Leden, H.v., Koike, Y. (1970) Detection of laryngeal disease by computer
technique. Arch. Otolaryngol. 91: 3-10
- Lehiste, I. (1970) Suprasegmentals. Cambridge, Mass: MIT-Press
- Levy, F. (1936) Über eine seltene Stimmstörung nach Strumektomie. med.
Diss. Königsberg
- Lieberman, P. (1961) Perturbations in vocal pitch. J. Acoust. Soc. Am.
33: 597-603
- Lieberman, P. (1963) Some acoustic measurements of the fundamental
periodicity of normal and pathological larynges. J. Acoust.
Soc. Am. 35: 344-352

- Luchsinger, R., Arnold, G.E. (1970) Handbuch der Stimm- und Sprachheilkunde, Bd. 1: Die Stimme und ihre Störungen. 3. verb. Aufl. Wien: Springer
- Lumby, H. (1977) Introduction. Proc. disc. sem. 8th congr. phon. scs. Leeds 1975. *Phonetica* 34: 249-251
- MacNeilage, P.F. (1972) Speech Physiology. In: Gilbert, J.H. (ed.) Speech and cortical functioning: 1-73. London: Academy press
- Mallard, A.R., Ringel, R.L., Horii, Y. (1978) Sensory contributions to the control of fundamental frequency of phonation. *Folia phoniat.* 30: 199-213
- Matsushita, H., Hirano, M., Kawasaki, H. (1975): Vibrations of the vocal cords in some pathological conditions. *J. Acoust. Soc. Am.* 58: S 112 (A)
- McGlone, R.E., Shipp, T. (1971) Some physiological correlates of vocal fry phonation. *J. Speech Hear. Res.* 14: 769-775
- Michel, J.F., Hollien, H. (1968). Perceptual differentiation of vocal fry and harshness. *J. Speech Hear. Res.* 11: 439-443
- Minifie, F.D. (1973) Speech acoustics. In: Minifie, F.D., Hixon, T.J., Williams, F. (eds.) Normal aspects of speech, hearing, and language: 235-284. New Jersey: Prentice Hall.
- Minnigerode, B. (1967) Untersuchungen zur Bedeutung der extralaryngealen Muskulatur für den Phonationsvorgang unter besonderer Berücksichtigung des M. cricopharyngeus. *Arch. klin. exp. Ohr.-Nas.-Kehlk.-Heilk.* 188: 604-623
- Minuck, M. (1976) Unilateral vocal cord paralysis following endotracheal Intubation. *Anaesthesiology* 45: 448-449
- Monsen, R.B., Engebretson, A.M. (1977) Study of variations in the male and female glottal wave. *J. Acoust. Soc. Am.* 62: 981-993
- Moore, G.P., v. Leden, H. (1958) Dynamic variations of the vibratory pattern in the normal larynx. *Folia phoniat.* 10: 205-238
- Moore, G.P. (1973) Terminal report for a conference on early detection of laryngeal pathology. Gainesville: Comm. scs. lab., dep. of speech, Univ. of Florida
- Moore, G.P. (1976) Observations on laryngeal disease, laryngeal behaviour and voice. *Ann. Otol. Laryngol* 85: 553-564
- Murry, T. (1971) Subglottal pressure and air-flow measures during vocal fry phonation. *J. Speech Hear. Res.* 14: 544-551

- Murry, T. (1975) Some acoustic features of hoarseness. J. Acoust. Soc. Am. 58: S 111 (A)
- Murry, T. (1977) Frequency perturbation and duration characteristics of pathological and normal speakers. J. Acoust. Soc. Am. 62: S 5 (A)
- Murry, T. (1978) Speaking fundamental frequency associated with voice pathologies. J. Speech Hear. Dis. 45: 374-379
- Murry, t., Bone, R.C. (1978) Aerodynamic relationships associated with normal phonation and paralytic dysphonia. Laryngoscope 88: 100-109
- Nassar, W.Y. (1977) Polytef (teflon) injection of the vocal cords. Experience with thirty-four cases. J. Laryng. Otol. 91: 341-347
- Negus, V.E. (1931) Observations on Semon's law. J. Laryng. 46: 1-30
- Nessel, E. (1960) Ober das Tonfrequenzspektrum der pathologisch veränderten Stimme. Acta otolaryngol.: Suppl. 157.
- Neumann, O.G., Kruse, C.G. (1974) Röntgenonologische Funktionsdiagnostik des Larynx. HNO. 22: 238-241
- Ohala, J.J. (1972) How is pitch lowered? J. Acoust. soc. Am. 52: S 124 (A)
- Ohala, J.J. (1977) Speculations on pitch regulation. Proc. disc. sem. 8th int. congr. phon. scs. Leeds 1975. Phonetika 34: 310-312
- Okamura, H., Gould, W.J., Tanabe, M. (1976) The role of the respiratory muscles in phonation. In: Loebell, E. (ed.) 16th int. congr. logop. phoniatic. Interlaken 1974: 351-356. Basel: Karger
- Ono, H., Saito, S., Fukuda, H., Tamura, H. (1976) Observations of the vocal cord vibration using on-line computer system and clinical application. In: Loebell, E. (ed.) 16th int. congr. logop. phoniatic. Interlaken 1974: 357-365. Basel: Karger
- Padovani, D. (1974) Objektivierung von Stimmveränderungen mit einer Zahl - ausgerechnet mit der Methode des gemeinsamen Schwerpunktes in der Contour-Display-Darstellung der Sonographie. Folia phoniatic. 26: 435-449
- Pahn, J., Pahn, E. (1975) Vorschlag zur Einschätzung des Schweregrades von Stimmstörungen. Folia phoniatic. 27: 472-479
- Painter, C. (1976) Pitch control and pharynx width in twi . Phonetika 33: 334-352

- Panconcelli-Calcia, G. (1953) Die Taschenbandstimme. Berlin: Akademie-Verl.
- Panconcelli-Calcia, G. (1961) 3000 Jahre Stimmforschung. Marburg: Elwert
- Peterson, G.E., Shoup, J.E. (1966) A physiological theory of phonetics. J. Speech Hear. Res. 9: 5-67
- Petronio, R., Sussi, P.L., Modena, S., Delaini, G.G., Virtuucci, F. (1978) Incidencia della paralisi ricorrentiale nella nostra cassistica di chirurgia tiroidea. Chir. Ital. 30: 501-507
- Perello, J. (1962) La théorie muco-ondulatoire de la phonation. Ann. Otolaryng. 79: 722-725
- Pernkopf, E. (1963) Atlas der topographischen Anatomie des Menschen. Bd. 1: Kopf und Hals. Hrsg. von H. Ferner. München: Urban und Schwarzenberg
- Potter, R.K., Kopp, G.A., Greene, H. (1966) Visible Speech. 3. Aufl. New York: Dover Pub
- Pozsgay, J., Heckenast, O., Vincze, L. (1967) Die konservative Behandlung der Lähmung des N. recurrens. HNO 15: 273-276
- Rabiner, L.R. (1977) On the use of autocorrelation analysis for pitch detection. IEEE Trans. ASSP-25: 24-33
- Rabiner, L.R., Schafer, R.W. (1978) Digital processing of speech signals. New Jersey: Prentice Hall
- Rohen, J. (1968) Über den konstruktiven Bau des M.vocalis bei Mensch und Primaten. HNO 16: 111-114
- Rontal, E., Rontal, M., Rolnick, M.I. (1975) Objective evaluation of vocal pathology using voice spectography. Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. 84: 667-671
- Rontal, E., Rontal, M., Morse, G., Brown, E.M. (1976) Vocal cord injection in the treatment of acute and chronic aspiration. Laryngoscope 86: 625-634
- Rothauser, E., Maiwald, D. (1969) Digitalized sound spectrograph using FFT and multiprint techniques. J. Acoust. Soc. Am. 45: S 308 (A)
- Rothenberg, M. (1972) A new inverse-filtering technique for deriving the glottal air-flow wave-form during voicing. J. Acoust. Soc. Am. 53: 1632-1645
- Rubin, H.J. (1960) The neurochronaxic theory of voice production - a refutation. Arch. Otolaryngol. 71: 913-920
- Rubin, H.J. (1963) Experimental studies on vocal pitch and intensity of phonation. Laryngoscope 73: 973-1015

- Sawashima, M. (1970) Laryngeal research in experimental phonetics. St. rep. speech res. 23: 69-116
- Sawashima, M. (1974) Laryngeal research in experimental phonetics. In: Seboek, T.A. (ed.) Current trends in linguistics vol. 12: 2302-2341
- Sawashima, M., Hirose, H., Nijmi, S. (1976) Glottal conditions in articulation of Japanese voiceless consonants. In: Loebell, E. (ed.) 16th int. congr. logop. phoniat. Interlaken, 1974: 405-414. Basel: Karger
- Schacht, U., Krämer, U., Gross, M. und Versmold, W. (1972) Die Häufigkeit der latenten und manifesten Rekurrensparese nach Schilddrüsenoperation. Zbl. Chir. 97: 1578-1583
- Schönhärl, E. (1962) Die Stroboskopie in der praktischen Laryngologie. Stuttgart: Thieme
- Schönhärl, E. (1963) Beitrag zur qualitativen Stimmanalyse Z. Laryng. Rhinol. Otol. 42: 130-139
- Schoultz-Coulon, H.J. (1975) Grundtonanalyse - ein Beitrag zur objektiven Beurteilung der Sprech- und Singstimme. HNO 23: 218-225
- Schoultz-Coulon, H.J. (1976) Die Bedeutung der kinaesthetisch reflektorischen Phonationskontrolle für die Genauigkeit der Stimme. Folia phoniat. 28: 335-349
- Schoultz-Coulon, H.J. (1978) Objektive Beurteilungskriterien für die Qualität der Stimmfunktion. Fortschr. Med. 96: 535-539
- Schüttke, H.K., van den Berg, Jw. (1976a) Determination of the subglottic pressure and the efficiency of sound production in patients with disturbed voice production. In: Loebell, E. (ed.) 16th int. congr. logop. phoniat. Interlaken 1974: 415-420. Basel: Karger
- Schüttke, H.K., van den Berg, Jw. (1976b) Efficiency of voice production in patients with a paralyzed larynx before and after cordectomy. Folia phoniat. 28: 288 (A)
- Scripture, E.W. (1902) The elements of experimental phonetics. New York: Scribner's
- Shipp, T., Huntington, D.A. (1965) Some acoustic and perceptual factors in acute laryngeal hoarseness. J. Speech Hear. Dis. 30: 350-359
- Shipp, T., McGlone, R.E. (1971) Laryngeal dynamics associated with voice frequency range. J. Speech Hear. Res. 14: 761-768

- Shipp, T. (1975) Vertical laryngeal position during continuous and discrete vocal frequency change. *J. Speech Hear. Res.* 18: 707-718
- Simon, T.H. (1979) Computersystem zur automatischen Langzeitauswertung dargestellt an zwei Untersuchungen mit defektivem Material. Im Druck
- Smith, S. (1954) Remarks on the physiology of the vibration of the vocal cords. *Folia phoniat.* 6: 166-178
- Smith, S. (1955) Vibration period of the vocal cords. Ton-Farbfilm
- Smith, S. (1958) Diplophonie und Luftschallexplosion. *Arch. Ohr.-Nas.-Kehlk. Heilk.* 173: 504-508
- Smith, S. (1970) Laryngographische Untersuchungen der Stimmlippen. *Folia phoniat.* 22: 169-175
- Smith, W.R., Lieberman, P. (1969) Computer diagnosis of laryngeal lesions. *Computers and Biomed. Res.* 2: 291-303
- Sobotta, J.H., Becher, H. (1965) Hrsg.) Atlas der Anatomie des Menschen, Bd. 2: Eingeweide, Verdauungs-, Atmungs-, Harn-, Geschlechtsapparat. 16. verb. Aufl. München: Urban und Schwarzenberg
- Sondhi, M.M. (1975) Measurements of the glottal waveform. *J. Acoust. soc. Am.* 57: 228-232
- Sonesson, B. (1958) Die funktionelle Anatomie des Cricoarytaenoid-Gelenkes. *Zschr. Anat. Entw.* 121: 292-303
- Sonesson, B. (1960) On the anatomy and vibratory pattern of the vocal fold. *Acta otolaryngol. Suppl.* 156
- Sonesson, B. (1970) The functional anatomy of speech organs. In: Malmberg, B. (ed.) *Manual of phonetics*: 45-75. Amsterdam: North-Holl.-Publ. Comp.
- Soninnen, A.A. (1956) The role of the external laryngeal muscles in length adjustment of the vocal cords in singing. *Acta otolaryngol. Suppl.* 130
- Stevens, K.N. (1977) Physics of laryngeal behaviour and larynx modes. *Proc. disc. sem., 8th int. congr. phon. scs. Leeds 1975.* *Phonetica* 34: 264-279
- Tanabe, M., Kitajima, K., Gould, W.J., Lambiase, A. (1975) Analysis of high-speed motion pictures of the vocal folds. *Folia phoniat.* 27: 77-87
- Tillmann, H.G. (1974) Das individuelle Subjekt und seine Identität im phonetischen Kommunikationsprozeß. *IPK-Forschungsber.* 48, Hamburg: Buske
- Timcke, R., v. Leden, H., Moore, P. (1958) Laryngeal vibrations: Measurements of the glottic wave. Pt. 1: The normal vibrators cycle. *Arch. Otolaryngol.* 68: 1-19

- Timcke, R., v. Leden, H., Moore, P. (1959) Laryngeal vibrations: Measurements of the glottic wave. Pt. 2: Physiologic variations. Arch. otolaryngol. 19: 438-444
- Titche, L.L. (1976) Causes of laryngeal nerve paralysis. Arch. otolaryngol. 102: 259-261
- Titze, I.R. (1973) The human vocal cords: a mathematical model I. Phonetica 28: 129-170
- Titze, I.R. (1974) The human vocal cords: a mathematical model II. Phonetica 29: 1-21
- Titze, I.R. (1976) On the mechanics of vocal cord vibration. J. Acoust. Soc. Am. 60: 1366-1388
- Titze, I.R., Strong, W.J. (1975) Normal modes in vocal tissues. J. Acoust. Soc. Am. 57: 736-744
- Ungeheuer, G. (1962) Elemente einer akustischen Theorie der Vokal-artikulation. Berlin: Springer
- Wängler, H.H. (1972) Physiologische Phonetik. Marburg: Elwert.
- Watt-Boolsen, S., Blichert-Toft, M., Hansen, J.B., Jorgensen, S.J., Boberg, A. (1977) Late voice function after surgical injury to the recurrent nerve. Clin. Otolaryngol. 2: 191-197
- Wechsler, E. (1977) A laryngographic study of voice disorders. Br. J. Disord. Comm. 12: 9- 22
- Wedin, S., Leanderson, R., Wedin, L. (1978) Evaluation of voice training. Spectral analysis compared with listener's judgements. Folia phoniat. 30: 103-113
- Wendahl, R.W. (1963) Laryngeal analog synthesis of harsh voice quality. Folia phoniat. 15: 241-250
- Wendahl, R.W. (1966a) Some parameters of auditory roughness. Folia phoniat. 18: 26-32
- Wendahl, R.W. (1976b) Laryngeal analog synthesis of jitter and shimmer. Auditory parameters of harshness. Folia phoniat. 18: 98-108
- Wendler, J., Wagner, H., Seidner, W., Stürzenbecher, E. (1976) Methodik bei Stimm-schallanalysen. In: Loebell, E. (ed.) 16th int. congr. logop. phoniat. Interlaken 1974: 518-521 Basel: Karger
- Winckel, F. (1952) Elektroakustische Untersuchungen an der menschlichen Stimme. Folia phoniat. 4: 93-113
- Winckel, F. (1953) Physikalische Kriterien für objektive Stimmbeurteilung. Folia phoniat. 5: 232-252

- Wirth, G. (1974) Zur Problematik der Stellung der gelähmten Stimmlippe in Abhängigkeit vom Ausfall der Kehlkopfnerve. Z. Laryng. Rhinol. Otol. 53: 327-333
- Wustrow, F. (1952) Bau und Funktion des menschlichen musculus vocalis. Z. anat. Entw. 116: 506-522
- Wyke, B. (1976) Laryngeal reflex mechanisms in phonation. In: Loebell, E. (ed.) 16th int. congr. logop. phoniat. Interlaken 1974: 528-537. Basel: Karger
- Wyke, B., Kirchner, J. (1975) Neurology of the larynx. In: Harrison, D., Hinchcliffe, R. (eds.) scientific foundations of otolaryngology: 222-252. London: Heinemann
- Yanagihara, N., Koike, Y., v. Leden, H. (1966) Phonation and respiration. Function study in normal subjects. Folia phoniat. 18: 323-340
- Yanagihara, N. (1967) Significance of harmonic changes and noise components in hoarseness. J. Speech Hear. Res. 10: 531-541
- Yoshioka, H., Sawashima, M., Hirose, H., Ushijama, T., Honda, K. (1977) Clinical evaluation of air usage during phonation. Ann. Bull. RILP 11: 175-190
- Zenker, W., Zenker, A (1960) Über die Regelung der Stimmlippenspannung durch von außen eingreifende Mechanismen. Folia phoniat. 12: 1-36

L e b e n s l a u f

- 25.12. 1951 Geboren in Dortmund als Tochter von Dr. med. Karl-Justus
Westerburg und seiner Frau Annemarie geb. Rost.
- 1958 - 1970 Schulzeit in Dortmund, Besuch der Gerhard-Hauptmann-Volks-
schule und des neusprachlichen Zweiges am Goethe-Gymnasium.
15. 6. 1970 Erhalt des Reifezeugnisses.
- 1970 - 1977 Studium an den philosophischen Fakultäten der Universitäten
Münster, Freiburg und München.
- 1976 Eheschließung.
20. 1. 1977 Erlangung des Grades eines Magister Artium, Fächerverbin-
dung: Slavische Philologie, Phonetik und sprachliche Kom-
munikation, Romanische Philologie.
- 1977 - 1979 Promotionsstudium an der philosophischen Fakultät der Univer-
sität München, Fächerverbindung: Phonetik und sprachliche Kom-
munikation, Psycholinguistik und Sprechwissenschaft, Slavische
Philologie.
- Juli 1979 Rigorosum.

